



Diseño y simulación de un sistema de generación distribuida fotovoltaica con conexión a la red eléctrica para el autoabastecimiento en el hogar.

Morejón Núñez, Ronald Vicmar

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico

Ing. Freire Llerena, Washington Rodrigo M.sc.

Latacunga

10 de febrero del 2022



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “Diseño y simulación de un sistema de generación distribuida fotovoltaica con conexión a la red eléctrica para el autoabastecimiento en el hogar”. fue realizado por el señor **Morejón Núñez, Ronald Vicmar**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 10 de febrero del 2022



Firmado electrónicamente por:
WASHINGTON
RODRIGO FREIRE
LLERENA

Ing. Freire Llerena Washington Rodrigo

C.C.: 180191088-4

Reporte de verificación de contenidos

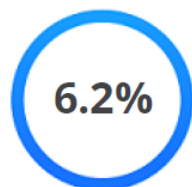


Tesis Revision.docx

Scanned on: 2:39 February 10, 2022 UTC



Firmado electrónicamente por:
WASHINGTON
RODRIGO FREIRE
LLERENA



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	402
Words with Minor Changes	140
Paraphrased Words	169
Ommited Words	1079



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Morejón Núñez, Ronald Vicmar**, con cédula de ciudadanía declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y simulación de un sistema de generación distribuida fotovoltaica con conexión a la red eléctrica para el autoabastecimiento en el hogar”**. Es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan el pie de las páginas correspondiente, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 10 de febrero del 2022

Morejón Núñez Ronald Vicmar

C.C.: 1722101845



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Morejón Núñez, Ronald Vicmar**, autorizo a la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño y simulación de un sistema de generación distribuida fotovoltaica con conexión a la red eléctrica para el autoabastecimiento en el hogar”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 10 de febrero de 2022

Una firma manuscrita en tinta azul que dice "Ronald Morejón".

Morejón Núñez Ronald Vicmar

C.C.:1722101845

Dedicatoria

Este proyecto va dedicado a Dios por ser mi soporte espiritual en el duro camino que viví hasta poder cumplir mi meta

A mis padres Olivia Núñez y Galo Morejón, por siempre apoyarme y mediante su sacrificio, consejos y toda su paciencia me impulsaron a culminar mi carrera universitaria y no rendirme en el camino.

Agradecimiento

Primeramente, a Dios por darme las fuerzas necesarias para vencer todo obstáculo que se me presento en mi camino.

A mi familia que siempre confió en mis sueños y me dieron la fuerza para poder cumplirlos

De manera especial a Silvia Herrera quien compartió su hogar conmigo cuando necesité un lugar para quedarme, quien durante de sus años de vida me dio una nueva apreciación del significado y la importancia de la amistad y solidaridad.

Al Ing. Washington Freire por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino por sus consejos, enseñanzas, apoyo y sobre todo amistad brindada en los momentos más difíciles por cumplir mi objetivo.

Tabla de contenido

Carátula.....	1
Certificación	2
Reporte de verificación de contenidos.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de tablas.....	12
Índice de figuras.....	13
Resumen	14
Abstract.....	15
Marco metodológico de la investigación	16
Planteamiento del problema	16
Formulación del problema	17
Antecedentes.....	17
Justificación e importancia	18
Objetivos.....	19
<i>Objetivo general</i>	19
<i>Objetivos específicos</i>	19
Metas.....	19
Marco teórico	21
Antecedentes investigativos.....	21
Fundamentación teórica	22
<i>Generación distribuida</i>	22

<i>Energía solar fotovoltaica</i>	23
<i>Sistemas fotovoltaicos</i>	23
<i>Componentes</i>	26
<i>Paneles fotovoltaicos</i>	27
<i>Regulador de carga</i>	28
<i>Regulador de carga PWM</i>	29
<i>Regulador de carga MPPT</i>	29
<i>Filtros DC y AC</i>	29
<i>Convertidores DC/AC</i>	29
<i>Algoritmos de control PWM</i>	30
<i>Cargas de consumo</i>	33
<i>Medidores bidireccionales</i>	33
Fundamentación conceptual	34
<i>Radiación solar</i>	34
<i>Irradiación</i>	34
<i>Irradiancia</i>	34
<i>Hora solar pico</i>	35
<i>Coordenadas solares</i>	35
<i>Inclinación de los paneles (β)</i>	35
<i>Conexión de un sistema fotovoltaico a la red</i>	36
<i>Descripción de los equipos requeridos para un sistema fotovoltaico</i>	37
<i>Caracterización de las cargas</i>	39

<i>Sistemática del dimensionamiento del SFCR</i>	39
Fundamentación legal.....	49
<i>Marco regulatorio del SGDA</i>	49
<i>Normas de distribución de energía eléctrica</i>	50
<i>Hipótesis</i>	51
<i>Sistema de variables</i>	51
<i>Operacionalización de variables</i>	51
Metodología de la investigación	53
Tipos de investigación.....	53
<i>Documental</i>	53
<i>Aplicada</i>	53
Diseño de la investigación.....	53
Técnicas de recolección de datos.....	54
Técnicas de análisis de datos	54
Técnicas de comprobación de hipótesis	54
Resultados de la investigación.....	55
Análisis de los resultados	55
<i>Medición de la radiación solar</i>	55
<i>Demanda de una vivienda</i>	56
<i>Factores de diseño</i>	57
<i>Respuesta del modelo</i>	58
Propuesta.....	62
Tema de la propuesta	62

Datos informativos	62
Objetivo general	62
Objetivos específicos.....	62
Justificación del proyecto:	62
Diseño de la propuesta.....	63
Información de la propuesta	63
<i>Parámetros de función y control</i>	63
<i>Esquemas y subsistemas</i>	67
Conclusiones y recomendaciones	77
Conclusiones.....	77
Recomendaciones	78
Bibliografía	79
Anexos.....	82

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Estratos de consumo</i>	51
Tabla 2	<i>Variables operacionales</i>	52
Tabla 3	<i>Mediciones realizadas el día 9 de enero del 2022</i>	55
Tabla 4	<i>Demanda promedio de una vivienda</i>	56
Tabla 5	<i>Parámetros para el diseño</i>	57
Tabla 6	<i>Parámetros eléctricos de la microrred</i>	64
Tabla 7	<i>Rangos característicos para voltaje de CC y CA</i>	64
Tabla 8	<i>Parámetros de control</i>	66

Índice de Figuras

Figura 1	<i>Esquema de un sistema fotovoltaico ON GRID básico</i>	25
Figura 2	<i>Componentes principales del panel solar fotovoltaico</i>	26
Figura 3	<i>PWM aplicada bajo una señal moduladora continua</i>	30
Figura 4	<i>SPWM unipolar en un inversor monofásico</i>	31
Figura 5	<i>SPWM bipolar en un inversor monofásico</i>	32
Figura 6	<i>Control MPPT</i>	33
Figura 7	<i>Inclinación del panel fotovoltaico</i>	36
Figura 8	<i>Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red</i>	37
Figura 9	<i>Distancia mínima entre paneles</i>	43
Figura 10	<i>Esquema de protección de sistemas fotovoltaicos</i>	47
Figura 11	<i>Curva de irradiancia diaria</i>	56
Figura 12	<i>Curva de demanda residencial</i>	58
Figura 13	<i>Análisis del Voltaje y la corriente</i>	59
Figura 14	<i>Voltaje de la microred</i>	59
Figura 15	<i>Microrred Activa - Reactiva</i>	60
Figura 16	<i>Señal Alpha and Beta</i>	59
Figura 17	<i>Corriente I_{α} and $I_{\alpha ref}$</i>	60
Figura 18	<i>Microrred Propuesta</i>	67
Figura 19	<i>Esquema de sistema de control</i>	68
Figura 20	<i>Esquema del subsistema de la trama $\alpha\beta$</i>	69
Figura 21	<i>Esquema del subsistema de control de potencia y corriente</i>	72
Figura 22	<i>Esquema del subsistema de referencia de potencia dinámica</i>	73
Figura 23	<i>Esquema del subsistema de bucle de control de corriente</i>	74
Figura 24	<i>Esquema del subsistema PRES</i>	75
Figura 25	<i>Esquema del bloque SVM</i>	76
Figura 26	<i>Subsistema adaptador a SVM</i>	76

Resumen

El presente proyecto consiste en diseñar y simular un sistema de generación distribuida fotovoltaica con conexión a la red eléctrica para el autoabastecimiento en el hogar; con la finalidad de establecer los índices de consumos de energía eléctrica para de esta manera implementar la energía fotovoltaica promoviendo así al sector público y privado el uso de energías limpias contribuyendo a disminuir las emisiones de carbono, reducir el calentamiento global y preservar el medio ambiente. El proyecto contiene una investigación bibliográfica donde se identificaron marcos regulatorios vigentes de generación distribuida en Ecuador y los estratos de consumo en el área de concesión de la EEQ. Se diseñó una Microrred conectada a la red compuesta por un convertidor de alimentación de red para su desarrollo, se procede a la estimación de la radiación solar y demanda de consumo de energía promedio en la ciudad de Quito a través del sitio web Global Solar Atlas en intervalos de tiempo de 1 hora. Los principales componentes del sistema fotovoltaico se dimensionan en base a la demanda de energía obtenida y estos son paneles solares, reguladores de carga, inversores para de esta manera elaborar un modelo base que opere como central y distribución de energía eléctrica. Finalmente, haciendo uso del software MATLAB se realizó simulaciones de la operación del sistema para visualizar parámetros de consumo en tres ambientes como son mañana, tarde y noche en función del voltaje y potencia.

Palabras claves:

- **ENERGÍA FOTOVOLTAICA**
- **ENERGÍAS LIMPIAS**
- **AUTOABASTECIMIENTO**
- **MICRORRED**

Abstract

This project consists of designing and simulating a photovoltaic distributed generation system connected to the electrical network for self-sufficiency in the home; with the purpose of establishing the rates of electrical energy consumption in order to implement photovoltaic energy, thus promoting the use of clean energy to the public and private sectors, contributing to reduce carbon emissions, reduce global warming and preserve the environment. The project contains a bibliographical research where current regulatory frameworks for distributed generation in Ecuador and the consumption strata in the EEQ concession area were identified. A Microgrid connected to the grid composed of a grid power converter was designed for its development, we proceed to the estimation of solar radiation and average energy consumption demand in the city of Quito through the Global Solar Atlas website in 1 hour time intervals. The main components of the photovoltaic system are sized based on the energy demand obtained and these are solar panels, charge regulators, inverters in order to develop a base model that operates as a power plant and distribution of electrical energy. Finally, using the MATLAB software, simulations of the system operation were carried out to visualize consumption parameters in three environments such as morning, afternoon and night depending on the voltage and power.

Key words:

- **PHOTOVOLTAIC ENERGY**
- **CLEAN ENERGIES**
- **SELF-SUPPLY**
- **MICROGRID**

Capítulo I

1. Marco metodológico de la investigación

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente el manejo de los combustibles fósiles a escala global ha provocado un gran impacto en el medio ambiente ocasionado por el abuso excesivo de los recursos naturales y daños irreversibles al medio ambiente como, la desertificación y la sequía, así como los residuos radiactivos; han logrado la toma de conciencia de nuestra sociedad. Un ejemplo de esto es que los Gobiernos actualmente emiten leyes aplicadas al sector energético, más restrictivas en cuanto a los criterios ambientales. Las energías renovables comienzan a vislumbrar como el camino hacia el desarrollo sostenible.

Las energías renovables, especialmente la hidráulica, la eólica y la solar, se consideran energías limpias, pero no están libres de inconvenientes; por su naturaleza difusa, ya que algunas de estas fuentes proporcionan energías de intensidad baja y distribuida sobre grandes superficies por lo que es necesario la construcción de centrales para su utilización. La utilización de paneles fotovoltaicos es una de las maneras más fáciles de transformar los rayos del sol en energía eléctrica utilizable sin que se dañe el medio ambiente.

La política nacional está prestando mayor atención al cuidado del medio ambiente promoviendo una mayor utilización de fuentes de energía limpia para la producción de electricidad y mitigar la contaminación ambiental. En Ecuador para la generación de energía se realiza fundamentalmente a partir de las centrales térmicas, pero también se emplean la generación de energía a partir de fuentes renovables como la hidráulica, biomasa, fotovoltaica, eólica y biogás e incorporadas desde Colombia y Perú. En el año 2021 la generación a partir de las fuentes renovables representó el 60.73%, la central más empleada es la hidráulica, el

resto de las energías renovables no son aprovechadas al máximo ya que la potencia instalada de estos recursos para la generación no es mayor al 2.3% del total.

1.2 Formulación del problema

La necesidad de realizar el diseño y simulación del sistema de autoabastecimiento de energía de un hogar para establecer los índices de consumos de energía eléctrica es el problema que se plantea en esta investigación.

1.3 Antecedentes

La evolución científica se ha buscado las vías para lograr una eficiencia energética; Ecuador actualmente se encuentra generando una transformación de su matriz energética, incentivando a la fomentación de proyectos, con base en fuentes renovables de energías no convencionales (CONELEC, 2008A)

En el año 2015 se publica la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE) que aborda algunos aspectos, entre estos los de interés perteneciente al servicio de energía eléctrica y alumbrado público. Además, se inaugura la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), la cual forja regulaciones observando la política de eficiencia energética y que deben cumplir algunas entidades públicas o privadas, tales como: empresas eléctricas, el Operador Nacional de Electricidad (CENACE) y los clientes o consumidores regulados. La generación de electricidad es regulada por la ARCONEL y por medio de la LOSPEE hace referencia a la modernización de las redes como es la generación distribuida, por lo que el 16 de agosto de 2018 la ARCONEL establece regulaciones para el desarrollo de esta y en ese mismo año aprueba la Dirección Nacional de Regulación Técnica.

En el año 2020 se fusionan algunas entidades como las Agencias de Regulación y Control Minero, Electricidad e Hidrocarburos para formar la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNNR), donde la regulación Nro. ARCERNNR-001/2021 expide el marco normativo de la Generación Distribuida para

autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica que habilita el proceso conexión, instalación y operación de este tipo de sistemas empleando energías renovables. Por consiguiente, el marco regulatorio ARCERNNR-002/2021 se orienta a las empresas que pueden realizar la actividad de generación.

Partiendo del creciente interés a nivel mundial por la preservación del medio ambiente y las bases legales existentes en el país, es necesario considerar el aporte de suministro energético a partir de las energías renovables y los beneficios aportados por ella; contamos con las bases para realizar una investigación con respecto al diseño y la simulación de un sistema de generación distribuida fotovoltaica con conexión a la red eléctrica para el autoabastecimiento en el hogar.

1.4 Justificación e Importancia

La implementación de la energía fotovoltaica es una vía que puede ayudar a desplazar el consumo de la energía eléctrica. El estado ecuatoriano promueve al sector público y privado la implementación de energías limpias para la elaboración de energías eléctrica. Poniendo en práctica la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica se instituye la actualización de las redes eléctricas donde se considerarán algunos marcos regulatorios, entre ellos la gestión de la generación distribuida; en la resolución 003/2021 El Directorio de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNNR) establece las pautas para autoabastecimiento regulado.

A partir de los reglamentos establecidos en el país, se propone diseñar un sistema de generación distribuida que contribuya a disminuir las emisiones de carbono, reducir el calentamiento global y preservar el medio ambiente.

Mediante la simulación se puede conocer el comportamiento de los parámetros involucrados en un sistema GDF y observar la tendencia de variables como la potencia,

voltaje y eficiencia, además se puede conocer la eficacia de los algoritmos de control implementados en el sistema de generación y sus posibles aplicaciones en trabajos futuros.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar y simular un sistema de generación distribuida fotovoltaica con conexión a la red eléctrica para el autoabastecimiento en el hogar.

1.5.2 Objetivos específicos

- Investigar los marcos regulatorios vigentes de la Generación Distribuida en Ecuador y los estratos de consumo en el área de concesión de la EEQ.
- Diseñar los componentes del sistema fotovoltaico sin almacenamiento de energía.
- Elaborar un modelo base que opere como central y distribución de energía eléctrica.
- Seleccionar el método de control aplicable a cada convertidor estático de potencia y del medidor bidireccional.
- Realizar simulaciones de la operación del sistema de generación distribuida mediante el software MATLAB.

1.6 Metas

- Se investigará todo lo referente a la Generación Distribuida en el País ya que con esas condiciones se elaborará un modelo que actúe como central de generación de energía eléctrica habilitada. Además, se investigará los estratos de consumo en el área de concesión de la EEQ para definir la carga eléctrica empleada.

- Se diseñará los componentes hardware del sistema fotovoltaico, tales como: paneles solares, reguladores de carga (convertidor DC-DC), inversor DC-AC y filtros.
- Se elaborará un modelo base que actuará como central y distribución de energía eléctrica en función del voltaje y potencia.
- Se seleccionará el algoritmo de control empleado a cada convertidor estático de potencia (DC-DC, DC-AC) y del medidor bidireccional.
- Se realizará simulaciones de operación que permitan visualizar los parámetros de consumo de energía eléctrica en tres ambientes (mañana, tarde y noche).

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1 Antecedentes Investigativos

El progreso científico se ha buscado las vías para lograr una eficiencia energética; Ecuador actualmente se encuentra generando una transformación de su matriz energética, incentivando a la fomentación de proyectos, con base en fuentes renovables de energías no convencionales (CONELEC, 2008A)

En el año 2015 se publica la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE) se abordan algunos aspectos, entre estos los de interés perteneciente a la prestación del servicio público. Además, se crea la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), la cual forja regulaciones observando la política de eficiencia energética y que deben cumplir algunas entidades públicas o privadas, tales como: empresas eléctricas, el Operador Nacional de Electricidad (CENACE) y los clientes o consumidores regulados. La generación de electricidad es regulada por la ARCONEL y por medio de la LOSPEE hace referencia a la modernización de las redes como es la generación distribuida, por lo que el 16 de agosto de 2018 la ARCONEL establece regulaciones para el desarrollo de esta y en ese mismo año aprueba la Dirección Nacional de Regulación Técnica.

En el año 2020 se fusionan algunas entidades como las Agencias de Regulación y Control Minero, Electricidad e Hidrocarburos para formar la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNNR), donde la regulación Nro. ARCERNNR-001/2021 expide el marco normativo de la Generación Distribuida para autoabastecimiento de consumidores regulados de energía eléctrica que habilita el proceso conexión, instalación y operación de este tipo de sistemas empleando energías renovables. Por consiguiente, el marco regulatorio ARCERNNR-002/2021 se orienta a las empresas que pueden realizar la actividad de generación.

Partiendo del creciente interés a nivel mundial por la preservación del medio ambiente y las bases legales existentes en el país, es necesario considerar el aporte de suministro energético a partir de las energías renovables y los beneficios aportados por ella; contamos con las bases para realizar una investigación con respecto al diseño y la simulación de un sistema de generación distribuida fotovoltaica con conexión a la red eléctrica para el autoabastecimiento en el hogar.

2.2 Fundamentación Teórica

La necesidad de la energía eléctrica, para la vida diaria y el aumento continuo y progresivo de su consumo ha creado la base para la investigación de fuentes renovables de energía y sistemas de producción eléctricos, estas nuevas tecnologías tienen su punto de mira en el uso de las energías renovables.

2.2.1 Generación distribuida

A nivel internacional concurren diversos conceptos sobre la Generación distribuida, que varían entre sí, con respecto al enfoque técnico, económico o legal a cuál se relacione; pero no existe una definición exacta a nivel internacional. De manera general la generación distribuida (GD) es la conectada a la red eléctrica y que se encuentra emplazada próximo a los lugares de consumo.

Los sistemas de GD son “los sistemas de generación que sirven a un usuario en el sitio o que alimenta una red de unidades de consumo y que se conecta a la red pública de distribución a los voltajes corrientes de distribución” (Agencia Internacional de Energía, 2002). Por lo general se encuentran compuestos por paneles fotovoltaicos, turbinas pequeñas, sistemas de generación a combustible de pequeño formato. Podemos definir que la Generación distribuida es un sistema de generación a pequeño o mediano formato que se encuentran instalados en las proximidades de las cargas particulares de sistemas conectados entre sí, iguales a los que se conectan a las redes de tensiones bajas y medias.

Los sistemas de GD se caracterizan porque con su instalación se minimiza la necesidad de la instalación o unión del circuito a centros de producción eléctrica de alta potencia; además mengua la construcción necesaria para llevar la electricidad al usuario final. El desarrollo tecnológico ha facilitado que la generación distribuida se pueda realizar por medio de distintas fuentes de energía renovable como la solar, la eólica, la biomasa, la hidráulica entre otras.

2.2.2 Energía solar fotovoltaica

La energía solar es la obtenida mediante la irradiación producida por el sol y es empleada principalmente para la generación de calor o para la generación de electricidad mediante paneles fotovoltaicos (Real Academia de la Lengua Española, s.f.).

Los sistemas fotovoltaicos son sistema de transformación inmediata de energía solar en eléctrica; por medio de esta conversión es posible realizar la generación de energía eléctrica. Para ello se utilizan elementos de conversión denominados paneles fotovoltaicos; estos se componen de placas que se integran por varias células de silicio que transforman la luz solar en energía eléctrica. Los más utilizados en proyectos de energía limpia son de alrededor de 300Wp con dimensiones aproximadas de 1m x 2m y un peso de 25 kg ya que son fáciles de transportar y manipular (Ministerio de Energías , 2019).

2.2.3 Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas solares fotovoltaicos se clasifican en: sistemas de aplicación off grid; estos son aquellos que se instalan para el suministro de energía a consumidores no conectados a la red eléctrica pública; sistemas on grid, son los sistemas que se conectan o instalan a unidades de consumo que se encuentran en la red de distribución de energía. De igual manera los podemos clasificar por sus componentes y funciones:

Sistemas fotovoltaicos autónomos

Este sistema está compuesto por el panel, el equipo electrónico y las baterías; es un sistema autónomo que responde a la demanda de energía de una casa, por ejemplo, sin que esta requiera de conectarse a la red eléctrica. Este tipo de conexión entra en la clasificación de off grid; ya que, aunque producen electricidad análoga a la de la red eléctrica no puede conectarse a una, por no contar con las funciones de sincronización, control y protección requeridas para ello.

Entre los sistemas autónomos podemos encontrar los sistemas híbridos, estos presentan similitudes con los anteriores sistemas pero incluyen una entrada para la conexión de un generador a base de diésel o la posibilidad de conectarse a la red, sirviendo esta conexión para alimentar las baterías o la carga en los casos donde la energía generada por los paneles fotovoltaicos no alcanza para cubrir la demanda (Ministerio de Energías , 2019). Los sistemas autónomos han sido empleados durante décadas en la electrificación rural donde se hace difícil la conexión a la red eléctrica pública.

Sistemas fotovoltaicos para conexión a la red

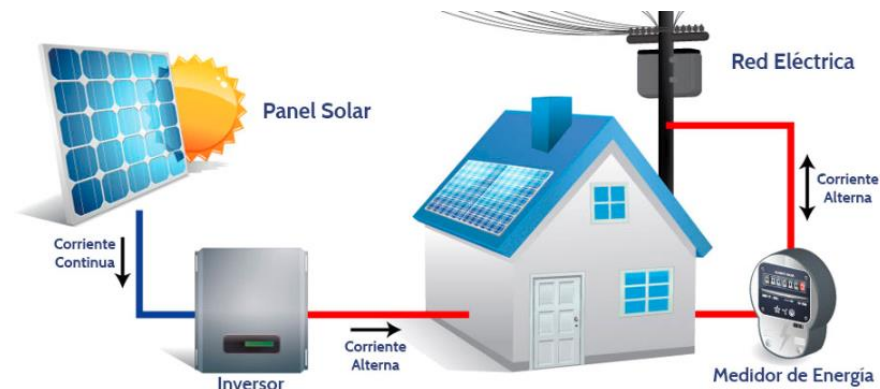
Con la aparición de los equipos fotovoltaicos con inversores on grid, que presentan funciones de sincronización, control y protección requerida para la vinculación a la red es factible la unión de la producción de energía eléctrica por paneles solares a los sistemas de generación. Estos inversores de conexión a red permiten transformar la electricidad proveniente de los paneles solares en electricidad apropiada para el empleo en los hogares o distribuir en la red eléctrica.

Los sistemas on grid se componen de paneles solares fotovoltaicos y los inversores; y este se conecta al sistema eléctrico del domicilio o centro laboral al que se encuentre instalado. El sistema correspondiente al panel fotovoltaico es el encargado de producir la

electricidad mientras haya luz solar, que se distribuye al consumidor y la energía sobrante se deriva a la red de distribución; en caso de que la energía producida por el panel no cubriese la demanda del consumidor esta se supliría con la energía suministrada desde la red pública.

Figura 1

Esquema de un sistema fotovoltaico ON GRID básico



Nota. La figura muestra un esquema de un sistema fotovoltaico ON GRID básico. Tomado de instalaciones fotovoltaicas. (Casa & Barrio, 2012).

Para la vinculación a la red los inversores se igualan su tensión a la existente en el sistema y en base a esta suministran la electricidad generada por los paneles solares. En caso de que la red pública no cuente con tensión o la tensión suministrada no se encuentre en los rangos establecidos por problemas de averías o reparaciones del sistema, los inversores se desconectan del sistema por seguridad. De ahí que estos sistemas no funcionen como respaldo ya que no proveen electricidad cuando la red no está activa, además que al no tener baterías no hay suministró si no se encuentra presente la luz solar.

Estos sistemas permiten reducir la energía generada mediante la utilización de combustibles fósiles y reducir las pérdidas de transmisión, pero requiere la disponibilidad la red eléctrica para los periodos donde no esté disponible la luz solar.

Sistemas Híbridos

Es la asociación de varias fuentes de energía para producir energía eléctrica para una carga aislada de la red o dentro de ella. Estos sistemas son generalmente constituidos por fuentes renovables donde sus recursos se consideran inagotables y si se requiere se pueden unir a sistemas de generación tradicionales, propiciando un sistema, concurrente a nivel medio ambiental y social.

“Los sistemas híbridos no requiere de un generador solar grande en los períodos de baja transferencia. Se utiliza en primer lugar la energía producida por el SFV al ser combinada con otra fuente controlable genera un suministro de energía fiable y disponible” (W. P. M. H. Heemels, 2009).

2.2.4 Componentes

Los paneles solares fotovoltaicos generalmente se componen de una cubierta de vidrio, el encapsulante, las celdas solares y el tedlar como se muestra en la figura 2

Figura 2

Componentes principales del panel solar fotovoltaico



Nota. La figura 2 muestra los componentes principales del panel solar fotovoltaico. Tomado de instalaciones fotovoltaicas. (Casa & Barrio, 2012).

2.2.5 Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos se encuentran conformados por conjuntos de células fotovoltaicas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos mediante el efecto fotoeléctrico.

Existen principalmente tres tipologías de PSF:

- Paneles solares fotovoltaicos
- Paneles solares térmicos
- Paneles solares híbridos (fotovoltaico + térmico)
- Panel solar fotovoltaico

Es el encargado de transformar la energía del sol en electricidad estos son una variante limpia para la generación de electricidad en casas, hospitales, comercios, escuelas, etc. Estos paneles están compuestos generalmente por unas células fotovoltaicas de silicio que, a partir del efecto fotoeléctrico, permiten convertir la energía solar en energía eléctrica.

Existen varios tipos de paneles solares fotovoltaicos que se clasifican en función de cómo estén constituidas las células fotovoltaicas, como:

- Monocristalinos (silicio)
- Policristalinos (silicio)
- Otros no compuestos por silicio como Thin Film o los Orgánicos.

Las células de silicio monocristalino se producen mediante bloques de silicio cilíndricos denominados lingotes. Es su proceso de producción se desarrollan láminas con bordes redondeados lo que propicia un alto desperdicio de sílice aunque se producen cristales que presentan un alto grado de pureza, provocando que el rendimiento de cada celda sea muy alto.

La fabricación de los paneles solares policristalinos difiere en gran medida de los monocristalinos ya que el bloque de silicio es fundido sin que se eliminen las impurezas que contiene, posteriormente es vertido en moldes cuadrados. Dando como resultado que las obleas sean perfectamente cuadradas, pero con impurezas, produciendo energía solar con menor eficiencia.

El nivel de pureza provoca que el panel monocristalino de 60 células (1,65m²) produzca 330 wp mientras que el panel policristalino de las mismas dimensiones produce 270wp. Se puede decir entonces que la generación de electricidad es un 20% mayor en los paneles monocristalinos en días soleados y a temperaturas de 25°, mientras que los paneles solares policristalinos disminuyen su producción de energía eléctrica a temperaturas altas (Sotysolar, 2022).

Los paneles orgánicos utilizan células de carbono y plástico, por lo que su fabricación es más barata. Además, presentan una flexibilidad estructural que permite instalarlos en superficies que no sean planas. Pero estos paneles presentan una menor eficiencia que los paneles antes abordados por lo general son un 50% menos eficientes que los diseños convencionales (Xataka , 2022).

2.2.5 Regulador de carga

El regulador de carga solar se pone entre el campo fotovoltaico y el sistema de conexión a la red controla el flujo de energía entre ambos equipos. Este se ejecuta controlando la Intensidad (I) y el Voltaje (V). Depende de la energía generada por el campo fotovoltaico y la requerida por la red. La función del regulador de carga es controlar el estado de cargas.

Las principales características de los reguladores de carga es que estos se configuraran en función de la batería a la cual se conecta y aplicara un algoritmo que permite alargar la vida útil del mismo; además protege la batería contra sobrecargas

compensando el voltaje desde el panel fotovoltaico evitando que el panel se dañe. Existen dos tipos de reguladores de cargas PWM y el MPPT.

2.2.6 Regulador de carga PWM

Este regulador modula por pulsos y trabaja de corte de paso de energía entre los paneles y la red. Para un funcionamiento correcto los voltajes nominales deben ser iguales. El sistema del regulador de carga PWM hace que los módulos trabajen a la tensión que sea necesaria para suministrar a la red, generando pérdidas de energía. Sin embargo, este equipo presenta un precio asequible y es fácil de transportar; es recomendable la implementación de este regulador cuando se empleen paneles solares de 12 voltios y 36 células ó de 24 voltios y 72 células (Autosolar, 2022).

2.2.6 Regulador de carga MPPT

Este regulador se basa en aprovechar al máximo la producción del panel solar, este regulador hace trabajar al panel en su máxima potencia. Interiormente reajusta el voltaje, al necesario, ganando en intensidad y conservando la potencia total de producción. Presenta un mejor trabajo cuando se aumenta la tensión del campo fotovoltaico. (Autosolar, 2022).

2.2.7 Filtros DC y AC

Los filtros se diseñaron para ser aplicados en inversores fotovoltaicos, su función es aumentar el rendimiento de los paneles solares sin intervenir en las funciones de control del inversor. Estos se encuentran favorables en una categoría de 25 a 1500 ADC, con bornas de 150 ADC y pletinas de hasta 1500 ADC. La tensión a máxima operativa es de 1200 VDC (Autosolar, 2022).

2.2.8 Conversores DC/AC

El inversor de voltaje, convierte la energía de corriente continua a corriente alterna, para ello, para funcionar necesita obtener el voltaje más bajo de la corriente alterna, además debe conectar el inversor a la red para que tenga un funcionamiento

normal (Morales Pizuña, 2021). El inversor es empleado en instalaciones fotovoltaicas, convirtiendo la corriente continua producida por los PF a corriente alterna para abastecer la carga eléctrica de una vivienda. (Renova Energía, 2019).

2.2.9 Algoritmos de control PWM

La variación por ancho de pulsos de una fuente de energía es donde se cambia el ciclo de trabajo de una señal periódica, para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. En la ecuación (1) se presenta el ciclo de trabajo de una señal periódica (Chito & Copete, 2011).

$$D = \frac{\tau}{T}$$

Ecuación 1

(Chito & Copete, 2011)

Donde:

D es el ciclo de trabajo,

τ es el tiempo en que la función es positiva

T es el período de la función

Figura 3 :

PWM aplicada bajo una señal moduladora continua



Nota. La figura muestra un PWM aplicada bajo una señal moduladora continua. Tomado de auto solar. (Autosolar, 2022).

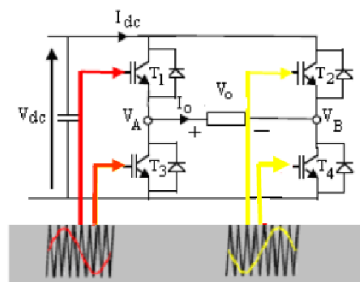
Un circuito PWM se basa en un corrector que presenta dos entradas y una salida. Las entradas son conectadas a una onda dientes de sierra y a una señal moduladora sin embargo en la salida la frecuencia es igualada a la señal dientes de sierra y el ciclo de trabajo está en función de la portadora como se observa en la figura 3. En los sistemas fotovoltaicos el PWM este sistema consiente transformar el ciclo de trabajo del inversor DC/DC modificando su procedimiento resistivo, también tiene otro empleo basada en realizar la conmutación del convertidor DC/AC para producir la onda sinusoidal. Las técnicas de control utilizadas en los sistemas fotovoltaicos son SPWM unipolar y SPWM bipolar (Chito & Copete, 2011).

Control SPWM unipolar

En el control los interruptores del puente completo no se disparan simultáneamente. Cada rama es controlada de manera aislada cotejando una señal triangular con la sinusoidal y su opuesta como se puede ver en la figura 4. En este tipo de control, la tensión de la salida $+V_{dc}$ y $-V_{dc}$ sucede cuando los interruptores conmutan siendo la frecuencia el doble de la inicial, donde las componentes armónicas aparecen como múltiplos del doble de la frecuencia de conmutación (Chito & Copete, 2011).

Figura 4

SPWM unipolar en un inversor monofásico



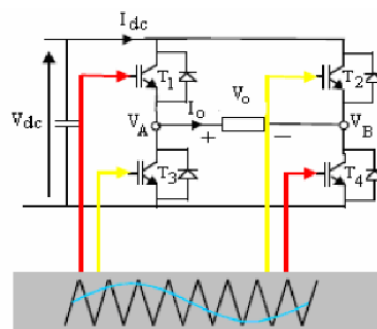
Nota. La figura muestra un SPWM unipolar en un inversor monofásico. Tomado de autosolar. (Autosolar, 2022).

Control SPWM bipolar

Para lograr que la onda varíe entre V_{dc} y $-V_{dc}$ lo para conseguir la onda sinusoidal apropiada para la salida del inversor se requiere que los interruptores del puente cambien de forma cruzada, es decir, que T1 y T4 estén saturados al mismo tiempo, y de igual forma para T2 y T3 (Chito & Copete, 2011).

Figura 5

SPWM bipolar en in inversor monofásico



Nota. La figura muestra un SPWM bipolar en in inversor monofásico. Tomado de auto solar. (Autosolar, 2022).

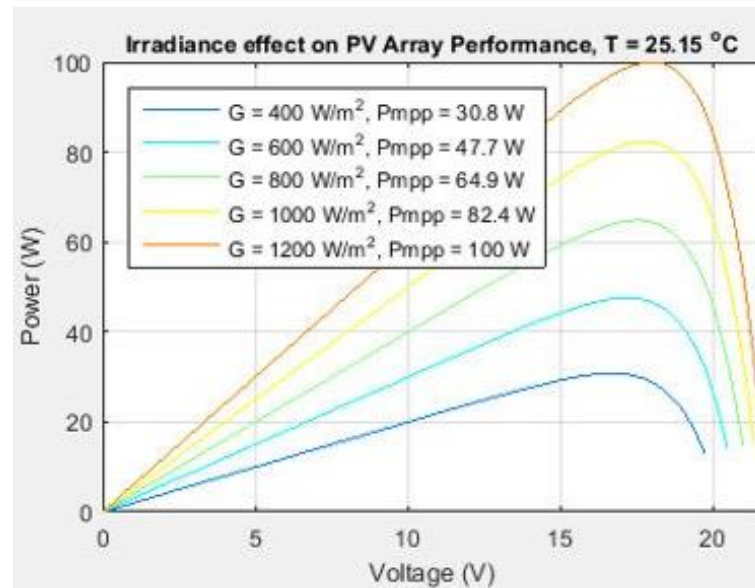
MPPT

El control de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT se aplica en los sistemas fotovoltaicos FV, cuyo propósito es mantenerlo operando cerca o en el sitio de potencia máxima del panel en condiciones variables como cambiar la irradiancia solar, la temperatura y la carga.

Además, controla el voltaje para asegurar que el sistema opere en el punto máximo de potencia, como se observa en la Figura 4.

Figura 6

Control MPPT



Nota. La figura muestra un control MPPT en función de la irradiación. Tomado de autosolar. (Autosolar, 2022).

2.2.9 Cargas de consumo

La cantidad de energía consumida en cada hogar siempre variará en función de las características y dimensiones de la vivienda; los equipos eléctricos del inmueble; la ubicación del suministro; el número de habitantes y los hábitos de consumo de los residentes. Las cargas de consumo eléctrico en el hogar pueden ser focos incandescentes o ahorradores, televisores tipo LED, radios, equipos estéreos, refrigeradoras, entre otras; son cargas de corriente continua y alterna (Macancela, 2012).

2.2.10 Medidores bidireccionales

En el transcurso del día los paneles solares producen energía eléctrica, la cual es inyectada a la red de distribución, esta energía es registrada mediante un medidor bidireccional. Es un elemento indispensable en los proyectos de energía renovable a escala residencial.

Este tipo de medidor diferencia entre la energía que suministra la red pública y la energía generada por los paneles solares cuando no se consume en su totalidad por usuario.

2.3 Fundamentación conceptual

Se reflejarán los parámetros de análisis principales para el desarrollo de la investigación en cuanto a un sistema solar fotovoltaico conectado a la red

2.3.1 Radiación solar

Es la energía que procede del Sol, esta puede ser disminuida por la reflexión de las nubes ya que reduce la radiación sobre la superficie terrestre; la absorción producida por los componentes del ambiente de carbono modifica los tipos de espectros de la radiación; esta también puede ser modificada por la dispersión de partículas ya que varía la repartición espacial de la radiación. La irradiación solar que toca a la Tierra se refleja como: 7% ultravioleta, 47% luz visible y 46% radiación infrarroja. La radiación electromagnética recibida en la tierra se encuentra comprendida entre 150 a 400 nm. Las células fotovoltaicas captan la mayor parte de luz visible, ya que la ultravioleta llega en poca cantidad y la infrarroja tiene poca energía (Casa & Barrio, 2012).

2.3.2 Irradiación

Energía solar incidente en una superficie determinada durante un tiempo de radiación, se mide en [kWh/m² o MJ/m²]

2.3.3 Irradiancia

Densidad de potencia o el valor instantáneo de radiación, se mide en [kW/m²]. Esta luminiscencia se denomina constante solar, presentando valor de 1000 W/m² al tocar a la superficie terrestre.

2.3.4 Hora solar pico

La hora solar pico (H.S.P) periodo de tiempo en horas con una irradiancia solar ideal de 1000 W/m² brindando igual irradiación solar que la real del día

2.3.5 Coordenadas solares

Las coordenadas solares se utilizan para saber la ubicación del sol en el cielo, en base a la posición del usuario.

- *Azimut (A, ψ)*: ángulo formado por la línea Norte-Sur y la proyección del rayo del sol
- *Altura solar (α)*: ángulo que varía a lo largo del día.
- *Cenital (ϑ)*: ángulo que forma el Sol con el y complementa la altura solar.
- *Latitud (ϕ)*: ángulo que forma la vertical del punto geográfico que se considere y el Ecuador

2.3.6 Inclinación de los paneles (β)

La inclinación de los módulos se determina de manera que los rayos del sol incidan perpendicularmente sobre el panel en horarios del mediodía

Por lo tanto:

$$\beta = \phi - \delta$$

Ecuación 2

(Castejón & Santamaría, Instalaciones solares fotovoltaicas, 2010)

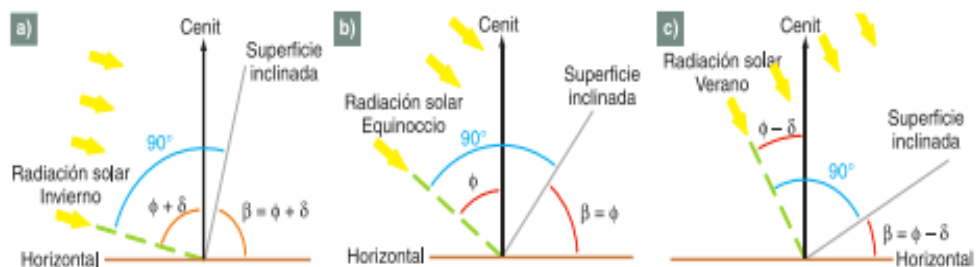
Dónde:

ϕ = Latitud.

δ = Su valor depende de las estaciones del año.

Figura 7:

Inclinación del panel fotovoltaico. a) Al mediodía del solsticio de invierno. b) Al mediodía de los equinoccios. c) Al mediodía del solsticio de verano.



Nota. La imagen muestra tres posiciones de los equinoccios. Tomado de instalaciones fotovoltaicas. (Casa & Barrio, 2012).

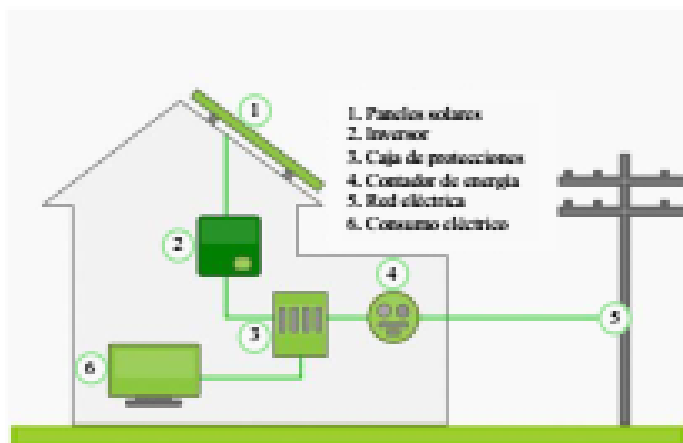
2.3.7 Conexión de un sistema fotovoltaico a la red

Cuando hablamos de un sistema fotovoltaico conectado a la red nos referimos a que este trabaja en paralelo con la red eléctrica de distribución perteneciente al electroenergético. En un principio el sistema fotovoltaico trabaja como un generador para la red cuando tiene excedentes en periodos de elevada irradiación solar, pero cuando el sistema fotovoltaico no puede satisfacer la demanda entonces es la red eléctrica la encargada de suministrar la energía requerida, por lo que no se requiere de un sistema de almacenamiento (Martínez, 2012).

Para la realización de estas instalaciones se requiere de: paneles fotovoltaicos, inversor de corriente y un contador bidireccional; además se requiere un acceso a la red eléctrica, esta ubicación es otorgada por la compañía eléctrica.

Figura 8:

Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red



Nota. La imagen muestra un esquema de un sistema fotovoltaico conectado a la red.

Tomado de replanteo de las instalaciones solares fotovoltaicas. (Martínez, 2012).

2.3.8 Descripción de los equipos requeridos para un sistema fotovoltaico

Panel Fotovoltaico

Se componen por una red células interconectadas como un circuito en serie con el objetivo de aumentar la tensión de salida además se conecta varias redes en paralelo aumentando la corriente eléctrica. Estos generan electricidad producto de la energía solar en forma de corriente continua, para transformarla a corriente alterna o aumentar la tensión es necesario conectar un convertidor de potencia. Los fabricantes indican en los datos del panel fotovoltaico que se avala el 90% de potencia en los 10 primeros años y una reducción al 80% en el periodo de 25 años (Instituto Tecnológico de Canarias, 2008).

Inversor o convertidor

Para realizar la transformación de la corriente continua obtenida del panel fotovoltaico a la corriente alterna de iguales condiciones que la de la red eléctrica, es necesario utilizar los inversores aplicados a sistemas fotovoltaicos con conexión a la red

eléctrica. Estos inversores pueden presentar salidas monofásicas o trifásicas con potencias que varían desde 1kW a centenas de kW. el estado de potencia del conector tiene una distribución en puente monofásico, empleando semiconductores de potencia transistores MOSFET. Generando una senoidal perfecta aplicando la técnica de modulación de ancho de pulsos PWM (Renova energía , 2022). Los inversores deben presentar las siguientes características:

- Debe llevar un seguidor PWM que permita el sondeo del de potencia máxima del generador fotovoltaico.
- Sistema de vigilancia y desconexión de la red; debe ser capaz de desconectarse automáticamente de la red si esta queda fuera de servicio.
- Debe estar protegido ante la ocurrencia de corto circuitos en la red alterna, alteración de la tensión y frecuencia de la red así como las distintas perturbaciones que se presenten en la red.
- El inversor debe presentar un consumo propio menor al 0.5% de su potencia nominal en el modo nocturno.
- Dentro de sus características eléctricas se debe considerar, que se activan a potencias principales de un 10% resistiendo picos de un 30%; A partir de una potencia nominal del 50%debe presentar rendimientos por encima del 92%, en dependencia de su ubicación debe tener un gado de protección mínima de IP20 cuando se encuentra en interiores y lugares difícil acceso; cuando se encuentra en interiores pero ubicado en lugares de fácil acceso el grado de protección debe ser IP30; cuando se coloca en el exterior su protección será de IP65.

Contador Bidireccional

La función del contador bidireccional, es medir la cantidad de energía suministrada a la red eléctrica y el consumo del beneficiario en los periodos que no exista irradiancia. El

mismo se posiciona en entre el inversor y la red eléctrica distribuidora (Instituto Tecnológico de Canarias, 2008).

2.3.9 Caracterización de las cargas

Demanda eléctrica

Es la demanda de energía del usuario determinada en las terminales receptoras en un periodo de tiempo establecido. A partir de la indicación del intervalo de tiempo de la variación del consumo para determinar la curva de carga. La demanda puede ser expresada en KVA, KVAR ó KW (Juárez, 1995). La curva de demanda es la representación del consumo eléctrico en un periodo de tiempo determinado, puede ser mensual, semanal, diario ó anual.

La demanda promedio es la constancia del proceso en un periodo de tiempo determinado y se puede determinar por las ecuaciones 2 y 3.

$$D_p = \frac{\text{Energía consumida en el tiempo}(kWh)}{\text{Tiempo}(h)}$$

Ecuación 3

(Juárez, 1995)

$$\text{Energía} = \sum ((\text{Tiempo}(h) \times (\text{Potencia}(W))))$$

Ecuación 4

(Juárez, 1995)

La máxima demanda se define por el consumo más elevado de un sistema, registrado en un periodo de tiempo determinado. En dependencia del objetivo propuesto la carga máxima puede ser determinada en periodos de 15 minutos, 30 minutos o 1 hora.

2.3.10 Sistemática del dimensionamiento del SFCR

Cálculo del generador fotovoltaico

Producto a las pérdidas en los componentes del sistema (cableado, Inversor, etc) se considera que la potencia nominal a cubrir es de un 10 a un 20% superior (Tobajas, 2018); la potencia requerida por el generador se puede determinar por la siguiente ecuación.

$$P_{GFV} = (P_{nominal})(\vartheta)[kW] \text{ (Tobajas, 2018)}$$

Donde

P_{GFV} : Potencia del generador fotovoltaico

$P_{nominal}$: Potencia nominal instalada.

ϑ : porcentaje comprendido entre un 10 – 20%.

Determinación de la cantidad de inversores y paneles solares

$$n^{\circ} \text{ de inversores} = \frac{P_{GFV}}{P_{inv}}$$

Ecuación 5

(Tobajas, 2018)

$$n^{\circ} \text{ de PFV} = \frac{P_{GFV}}{P_{nominal PFV}}$$

Ecuación 7

(Tobajas, 2018)

$$P_{pico} = (n^{\circ} \text{ dr PFV})(P_{nominal PFV})$$

Ecuación 8

(Tobajas, 2018)

Donde:

P_{inv} : Potencia nominal a la salida del inversor (kW).

P_{GFV} : Potencia nominal del panel fotovoltaico (W).

P_{pico} : Potencia pico del generador fotovoltaico (kW).

Cálculo de los parámetros en el rango de temperaturas de 10 °C a 70 °C para el Panel Fotovoltaico.

a) Rango mínimo

$$V_{mpp(70^{\circ}C)} = V_{mpp} + \beta(T - 25)$$

Ecuación 6

(Mascarós, 2016)

b) Rango máximo

$$V_{mpp(-10^{\circ}C)} = V_{mpp} + \beta(T - 25)$$

Ecuación 10

(Mascarós, 2016)

c) Voltaje máximo en vacío del módulo fotovoltaico

$$V_{\alpha(-10^{\circ}C)} = V_{\alpha} + \beta(T - 25)$$

Ecuación 11

(Mascarós, 2016)

d) Corriente máxima del panel fotovoltaico

$$I_{sc(70^{\circ}C)} = I_{sc} + \alpha(T - 25)$$

Ecuación 12

(Mascarós, 2016)

Donde:

V_{mpp} : Voltaje pico del módulo fotovoltaico (V).

β : Coeficiente de temperatura de V_{oc} (mV/°C).

T : Temperatura de célula de -10 °C y 70 °C respectivamente.

V_{oc} : Voltaje de circuito abierto del panel fotovoltaico (V).

I_{sc} : Corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico (A).

α : Coeficiente de temperatura de I_{sc} (mA/°C).

1. Número de módulos fotovoltaicos horizontales y verticales

a) Número mínimo de paneles en serie (N_s)

$$N_s \geq \frac{V_{inv\ min}}{V_{mpp(70^\circ C)}}$$

b) Número máximo de paneles en serie

$$N_s \leq \frac{V_{inv\ min}}{V_{mpp(-10^\circ C)}}$$

c) Número máximo de paneles en paralelo (N_p)

$$N_p \leq \frac{I_{inv\ min}}{I_{sc(70^\circ C)}}$$

2. Inclinación y orientación de los paneles fotovoltaicos

Para definir la inclinación ideal del panel fotovoltaico que certifique la captación máxima de energía durante todo el año, se aplica la ecuación resultante del análisis de la irradiación solar a nivel global para las diferentes inclinaciones en las diversas latitudes (Mascarós, 2016).

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.69 * |\phi|$$

Donde:

β_{opt} : ángulo de inclinación óptima (grados).

$|\phi|$: latitud del lugar (grados decimales)

La inclinación del módulo fotovoltaico no debe ser inferior a 15° , para que los desechos de la parte superior del panel se eliminen por la lluvia. (Mascarós, 2016), la pérdida por inclinación se determina según la siguiente ecuación.

$$Perdidas (\%) = 100 * [1.2 \times 10^{-4} (\beta - \phi + 10)^2]; \text{ para } \beta \leq 15 \text{ (Mascarós, 2016)}$$

Donde:

β : inclinación del generador fotovoltaico (grados).

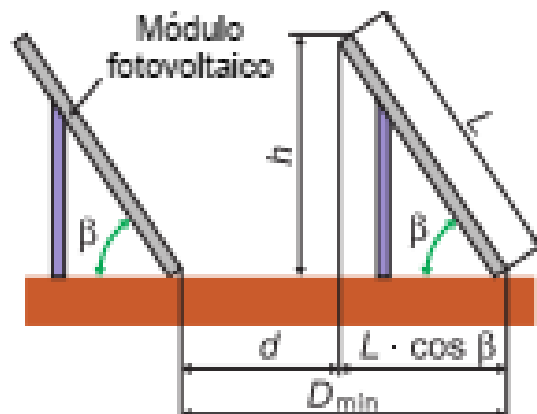
$|\varphi|$: latitud del lugar (grados decimales)

3. Distancia entre las filas de los paneles

En el desarrollo de la instalación fotovoltaica es requerido dejar un margen entre las filas de los paneles para evitar que se produzcan sombras entre ellos, al dejar esta separación se garantiza al menos 4 horas de sol en el invierno. La altura proyectada en el eje vertical se calcula por la relación entre el ángulo de inclinación del panel y la longitud del elemento como se muestra en la siguiente figura 9.

Figura 9

Distancia mínima entre paneles



Nota. La figura identifica la distancia mínima entre paneles. Tomado de gestión de montaje de instalaciones. (Mascarós, 2016).

$$h = L \times \text{sen}(\beta)$$

Ecuación 19

(Castejón & Santamaría, 2010)

La distancia mínima entre las filas se calcula por la siguiente se calcula como:

$$d = \frac{h}{\operatorname{tg}(61^\circ - \phi)}$$

Ecuación 20

(Castejón & Santamaría, 2010)

La distancia entre las bases de las filas de los paneles se determina como:

$$D_{min} = d + L \times \cos(\beta)$$

Ecuación 21

(Castejón & Santamaría, 2010)

Dónde:

h : altura proyectada sobre la vertical de un módulo (m).

L : longitud del módulo (m).

β : inclinación del módulo ($^\circ$).

d : distancia mínima (m).

ϕ : latitud del lugar ($^\circ$).

D_{min} : distancia mínima entre filas de módulos (m).

1. Cálculo del cableado

La sección del conductor, se considerará las siguientes conexiones (Castejón & Santamaría, 2010)

- Conexión entre los módulos
- Conexión entre el generador fotovoltaico y el inversor
- Conexión entre el inversor el centro de protección y medida

Las conexiones se dimensionarán de manera que sean 125% superior o igual 125% a la máxima intensidad del generador, la caída del voltaje no debe superar el 1.5% (Castejón & Santamaría, 2010)

$$I_n = 1.25(I_{sc})$$

$$V_{G\ mpp} = N_s \times V_{mpp}$$

Ecuación 7

(Castejón & Santamaría, 2010)

$$I_{inv\ ca} = \frac{\sum P_{n\ inv}}{\sqrt{3} \times V_{v\ ca} \times \cos \varphi}$$

Ecuación 23

(Castejón & Santamaría, 2010)

$$S = \frac{200 * I_n * \cos \varphi}{\Delta V_{\%} * V * \gamma_{\theta}} ; \text{ para líneas monofásicas y CC}$$

Ecuación 24

(Castejón & Santamaría, 2010)

$$S = \frac{\sqrt{3} * 100 * I_n * l * \cos \varphi}{\Delta V_{\%} * V * \gamma_{\theta}}$$

Ecuación 25

(Castejón & Santamaría, 2010)

Donde:

I_n : corriente en cada tramo de conexión del sistema fotovoltaico (A).

$V_{G\ mpp}$: voltaje pico del generador fotovoltaico en la rama (V).

$I_{inv\ ca}$: intensidad nominal a la salida de los inversores (A).

$P_{n\ inv}$: potencia nominal de cada inversor (kW).

$V_{n\ ca}$: voltaje nominal del sistema en corriente alterna (V).

$\cos \varphi$: factor de potencia de la carga al final de la línea.

S: sección del conductor (mm²).

l: longitud de la línea (m).

$\Delta V\%$: caída de voltaje máxima permitido en porcentaje de la tensión de la línea (%).

V: voltaje de la línea (V).

γ_{θ} : Conductividad del conductor a la temperatura de servicio θ prevista ($s \cdot m \cdot 2$).

La conductividad del conductor se debe a tomar a la temperatura de servicio del cable que, para el caso de aislamiento termoplástico, a 90 °C es $\gamma_{90} = 45 \text{ s}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$ y con 75 °C, $\gamma_{75} = 47 \text{ s}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$ (Castejón & Santamaría, 2010)

2. Equipos de protección y maniobras

a) Interruptor termomagnético para las ramas del generador fotovoltaico

Los interruptores deben ser específicamente para corriente continua (Castejón & Santamaría, 2010)

$$I_n \geq 1.25I_{sc}$$

Ecuación 26

(Castejón & Santamaría, 2010)

$$V_{s oc} = N_s * V_{oc}$$

Ecuación 27

(Castejón & Santamaría, 2010)

$$V_n \geq V_{s oc}$$

Ecuación 28

(Castejón & Santamaría, 2010)

Donde:

I_n : corriente nominal del interruptor termomagnético (A).

I_{sc} : corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico (A).

V_{oc} : voltaje de circuito abierto del panel fotovoltaico (V).

$V_{s oc}$: voltaje de circuito abierto del generador fotovoltaico en la rama (V).

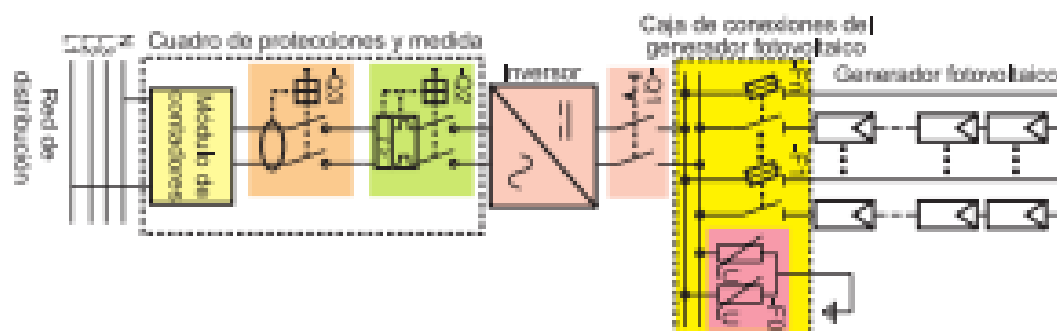
V_n : voltaje nominal del interruptor termomagnético (V).

b) Protección a sobrevoltajes

Las protecciones ante sobrevoltajes del sistema fotovoltaico, son instaladas en la caja de conexiones del generador entre la conexión del positivo, negativo y toma a tierra como se muestra en la figura (Castejón & Santamaría, 2010)

Figura 10

Esquema de protección de sistemas fotovoltaicos



Nota. La imagen muestra un esquema de protección de sistemas fotovoltaicos. Tomado de gestión de montaje de instalaciones. (Mascarós, 2016).

$$V_n \geq 1.2 * V_n$$

Ecuación 29

(Holguín & Gomezcoello, 2010)

Donde

V_n : Voltaje nominal del empleo del limitador de voltajes (V)

c) Fusibles de los paneles fotovoltaicos

Para el diseño de los fusibles de protección para los paneles se deben verificar lo siguiente:

$$I_N > 1.8x$$

Ecuación 30

(Holguín & Gomezcoello, 2010)

$$I_N < 2.4xI_{sc}$$

Ecuación 31

(Holguín & Gomezcoello, 2010)

$$V_N \geq \text{Máximo voltaje de entrada al inversor}$$

Ecuación 32

(Holguín & Gomezcoello, 2010)

Donde:

I_N : corriente nominal al fusible (A)

V_N : Voltaje nominal del fusible (V)

d) Protecciones para el inversor

El convertidor debe presentar protecciones para sobrecargas, cortocircuitos y contra contactos directos e indirecto para lo que se deben aplicar interruptores termomagnéticos y de diferencial (Holguín & Gomezcoello, 2010).

$$I_n \geq 1.25xI_{inv}$$

Ecuación 33

(Holguín & Gomezcoello, 2010)

$$V_n = V_{n\ ca}$$

Ecuación 34

(Holguín & Gomezcoello, 2010)

I_n : corriente nominal del interruptor termomagnético (A)

I_{inv} : intensidad nominal a la salida del inversor (A)

V_n : Voltaje nominal del interruptor termomagnético (V)

V_{nca} : Voltaje nominal del sistema de corriente alterna (V)

2.4 Fundamentación legal

El artículo 15 de la Constitución de la República del Ecuador señala que corresponde al Estado suscitar, la aplicación de tecnologías limpias y de producción de energías amigables con el medio ambiente, a el desarrollo energético no se realizará en quebranto de la producción alimentaria, ni afectará el derecho al agua (Asamblea Constituyente del Ecuador , 2008).

2.4.1 Marco regulatorio del SGDA

La regulación ARCERNNR 001-2021 establece el proceso de habilitación, conexión, instalación y operación GD para autoabastecimiento de clientes regulados de energía eléctrica situados dentro de la misma área de servicio y cumpla las siguientes condiciones (ARCERNNR, 2021):

- La potencia nominal sea menor a 1 MW.
- Se conecte en sincronismo a la red de distribución del sistema eléctrico o por medio de las instalaciones internas del consumidor. Además, el inversor debe estar conectado en sincronía con la potencia de la red eléctrica.
- Permite el aprovechamiento energético renovable disponible en la zona perteneciente a la Empresa Distribuidora.
- Puede emplear diversos tipos de sistemas de generación de electricidad con la presencia o no de sistemas de almacenamiento.

La potencia nominal SGDA en consumidores existentes se realiza el estudio técnico en base a los últimos 24 meses y en caso de ser consumidor nuevo se establece una estimación de la demanda de energía.

La regulación ARCERNNR 002-2021 establece las condiciones técnicas y comerciales que requiere el desarrollo u operación de las centrales GD habilitadas para ejecutar la actividad de generación y cumpla las siguientes condiciones (ARCERNNR, 2021):

- Tener una capacidad nominal entre 100 a 10 MW.
- La conexión debe ser a través de las redes de voltajes menores a 138 kV y estar cerca del consumo.
- Utilizar una fuente de energía renovable no convencional. Sin embargo, las centrales que incluyan el PME pueden emplear combustibles fósiles.
- No se incluye a las empresas auto generadoras ni a los grupos electrógenos de emergencia como parte de la central GD.

2.4.2 Normas de distribución de energía eléctrica

Los clientes residenciales del área de concesión de la EEQ se clasifican acorde a las escalas de consumo, tal como se indica en la Tabla 1; que determina las demandas máximas diversificadas. Los estratos de consumo A, B, C, D y E considera los electrodomésticos básicos y el calentamiento de agua; en cambio la categoría A1 incluye lo anterior más el equipo de cocción.

Para definir el consumo de un proyecto, se debe ubicar el sitio del proyecto de manera georreferenciada a partir de los apéndices A-11-A. (EEQ, 2014)

Tabla 1*Estratos de consumo*

<i>Categoría</i>	<i>Consumo (kWh/mes/cliente)</i>	<i>Demanda diaria (KW)</i>	<i>Carga instalada(kW)</i>
A1	501 – 900	4.7	15.82
A	351 – 500	4.7	15.82
B	251 – 350	3.4	9.80
C	151 – 250	2.5	6.30
D	101 – 150	1.6	3.22
E	0 – 100	1.1	1.84

Nota. La tabla muestra los diferentes estratos según el consumo del usuario

2.4.3 Hipótesis

El diseño y simulación de un sistema de generación distribuida para el autoabastecimiento en el hogar permitirá dar una visión más cercana a la realidad sobre el consumo de energía suministrada por la red eléctrica y energía solar fotovoltaica.

2.4.4 Sistema de variables

- **Variable independiente:** El sistema de Generación Distribuida mediante el software MATLAB.
- **Variable dependiente:** El consumo de energía eléctrica establecido por el estrato de consumo en el Área de Concesión de la EEQ y las regulaciones de la Generación Distribuida por el ARCERNNR.

2.4.5 Operacionalización de variables

Tabla 2*Variables operacionales*

Variables	Definición conceptual	Definición Dimensiones	Operacional Indicadores
Variable independiente: El sistema de Generación Distribuida mediante el software MATLAB	El diseño y simulación de un sistema fotovoltaico conectado a la red nos permite conocer el consumo de energía de demanda de la vivienda, así como la confiabilidad del sistema y el ahorro energético resultante	Seleccionar el equipamiento del sistema Modelación del sistema fotovoltaico conectado a la red	Paneles solares Inversor Medidor bidireccional Parámetros eléctricos del sistema fotovoltaico
Variable dependiente: El consumo de energía eléctrica establecido por el estrato de consumo en el Área de Concesión de la EEQ y las regulaciones de la Generación Distribuida por el ARCERNNR.	El análisis de los datos nos facilita el entendimiento de las variables energéticas del sistema y su factibilidad	Ganancia del sistema fotovoltaico Balance de potencia del sistema	Energía solar del sistema fotovoltaico. Energía producida por el sistema fotovoltaico Potencia del sistema fotovoltaico conectado a la red y sus componentes Potencia de la red eléctrica

Nota. La tabla muestra las diferentes variables operacionales

Capítulo 3

3. Metodología de la investigación

3.1 Modalidad de la investigación

Con la finalidad de conocer las implicaciones de un sistema fotovoltaico conectado a la red pública, se realizó un estudio para dar solución al problema basado en la factibilidad de emplear sistemas de paneles fotovoltaicos conectados a la red para abastecer la demanda eléctrica del hogar; para desarrollar el estudio se analizaron los componentes requeridos para la producción de energías limpias.

3.2 Tipos de investigación

El estudio se desarrolló con base a la investigación documental y aplicada, siendo requerida para la misma una amplia revisión bibliográfica y la aplicación técnica.

3.2.1 Documental

La investigación documental es la base para la realización de la revisión bibliográfica y la recolección de información con respecto al tema abordado. Este análisis documental nos permite establecer los modelos a seguir para el desarrollo del trabajo.

3.2.2 Aplicada

La investigación aplicada se centró en la simulación mediante MATLAB del sistema de abastecimiento de un hogar mediante un panel fotovoltaico conectado a la red.

3.3 Diseño de la investigación

El desarrollo de trabajo implica un aporte adquirido en las materias recibidas por la carrera de Ingeniería en Electromecánica como electrónica de potencia y centrales de generación de energía eléctrica y aportes nuevos de investigación proporcionados por el estudiante. Ante ello, se utiliza el software de simulación MATLAB que permitirá la

simulación mediante el diseño de generación distribuida, donde se podrá observar algunos parámetros importantes como la potencia, voltaje y eficiencia.

3.4 Técnicas de recolección de datos

La selección de datos, se establecerá mediante textos que contengan investigaciones actualizadas sobre la temática de estudio. Mediante las fuentes primarias y secundarias como libros, revistas e informes técnicos.

3.5 Técnicas de análisis de datos

Al determinar los parámetros de diseño para los cuales se realizará la simulación y la selección del conjunto de elementos que compondrá el sistema solar fotovoltaico a través de los gráficos brindados como respuesta del modelo podemos definir la potencia a la cual trabajara el sistema que ayudaran a la formulación de conclusiones.

3.6 Técnicas de comprobación de hipótesis

Partiendo del análisis de la simulación del sistema solar fotovoltaico se puede establecer el comportamiento de los equipos seleccionados ante la carga de consumo y la irradiancia, de manera que podamos determinar la factibilidad del sistema propuesto.

Capítulo 4

4. Resultados de la investigación

4.1 Análisis de los resultados

4.1.1 Medición de la radiación solar

La medición de la irradiancia se obtuvo a través del sitio web Global Solar Atlas para las coordenadas pertenecientes a la localidad de Belisario y el reporte de radiación solar de la secretaria de ambiente registrado para el día 9 de enero del 2022, tomado para intervalos de tiempo de 1 hora, en la tabla 3 se presenta los resultados obtenidos; en la figura se presenta la curva de irradiancia.

Tabla 3:

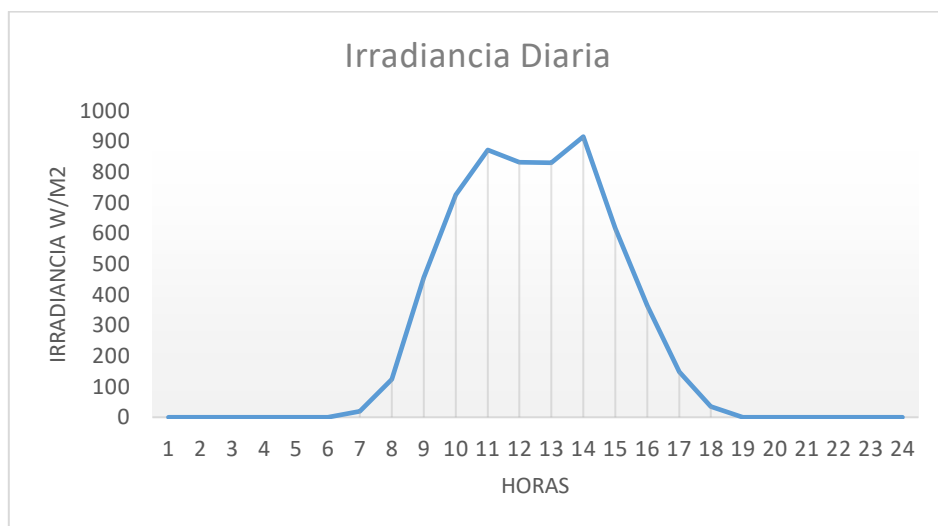
Mediciones realizadas el día 9 de enero del 2022

Hora	Irradiación (w/m ²)
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	18,65
7	123,48
8	455,83
9	725,93
10	871,5
11	830,59
12	829,68
13	914,8
14	615,78
15	363,18
16	148,74
17	34,69
18	0

Nota. La tabla muestra la erradicación realizada en el día, a partir de la hora 18 a la 24 fue de 0.

Figura 11

Curva de Irradiancia Diaria



Nota. La imagen 11 muestra la curva diaria de irradiación

Tomando como punto de partida las mediciones realizadas se obtiene una irradiación por cálculo de 5,93 kWh/m² día.

4.1.2 Demanda de una vivienda

Para el análisis de la demanda de una vivienda se caracterizará el consumo promedio por equipos de una vivienda como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4:

Demanda promedio de una vivienda

Sitio		Electrodoméstico		
		Cantidad	kW	Total
Cocina	Nevera	1	0,25	0,25
	Lavadora	1	0,33	0,33
	Horno Microondas	1	0,8	0,8
	Sandwichera	1	1,2	1,2
	Cocina de inducción	1	8	8
	Licuada	1	0,35	0,35
	Plancha	1	1,2	1,2
Habitación y estudio	Televisor	1	0,11	0,11
	Computador	1	0,1	0,1
	Impresora laser	1	0,11	0,11

Sitio	Electrodoméstico			
	Cantidad	kW	Total	
Baño	Teléfono inalámbrico	1	0,03	0,03
	Equipo de sonido	1	0,08	0,08
	Videojuegos	1	0,1	0,1
	Secador de pelo	1	1	1
	Plancha de pelo	1	0,5	0,5
Iluminación	Bombillo led	4	0,02	0,08
Parqueadero	Motor de puerta	1	0,746	0,746
	Bombillo led	10	0,02	0,2
	Punto de recarga modo 3	1	7,6	7,6
Demanda			22,786	

Nota. La tabla muestra la Demanda promedio de una vivienda

4.1.3 Factores de diseño

Para la realización del diseño del sistema de paneles fotovoltaico y con los datos anteriormente expuestos se determinaron los siguientes parámetros para el diseño expuestos en la tabla 5.

Tabla 5

Parámetros para el diseño

Factores de Diseño	Cantidad	Unidad de medida
Irrad_Calculado	5,93285	kWh/m ²
Área techo en V	100	m ²
Eficiencia	20,17	%
Demanda	22,786	kW
Horas pico de sol	4,1	H
Tamaño del sistema	5,557560	kW
Potencia Panel(diseño)	400	W
# preliminar de paneles	13,89390	# paneles
Porcentaje para pérdidas	30	%
# total de paneles	18,06	# paneles

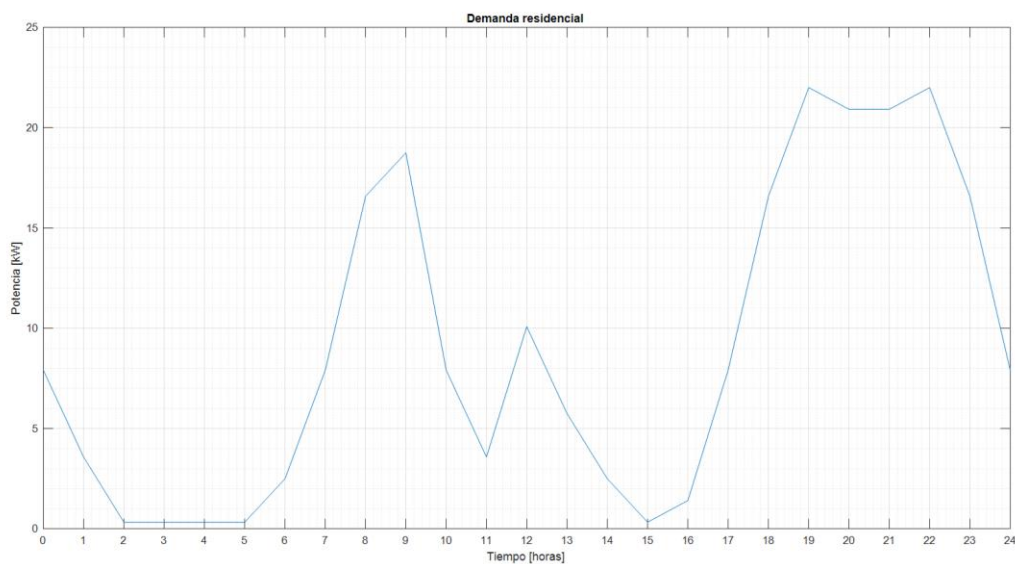
Nota. La tabla muestra los parámetros para el diseño

4.1.4 Respuesta del modelo

En la figura 12 se presenta la curva de demanda de la residencia tomada como caso de estudio, en ella se puede evidenciar que se presentan dos grandes picos de consumo eléctrico el primero en horarios del mediodía y el segundo en horarios nocturnos. En la figura 13 y 14 se representa el comportamiento del voltaje y la corriente en un espacio de 0.5s donde se puede ver que la corriente de salida y la salida de voltaje se mantienen estables; en la figura 15 se muestra se presenta la potencia activa y reactiva; la potencia activa no llega a los 7 kW, la potencia reactiva, fluctúa cerca de 0 y 1 se conserva estable.

Figura 12:

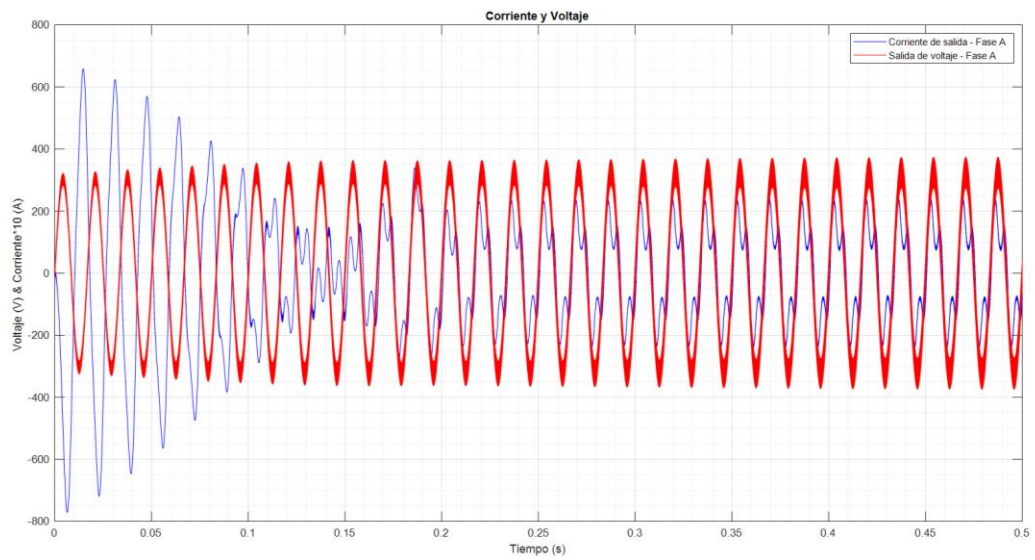
Curva de demanda residencial



Nota. La imagen muestra la curva de demanda residencial

Figura 13

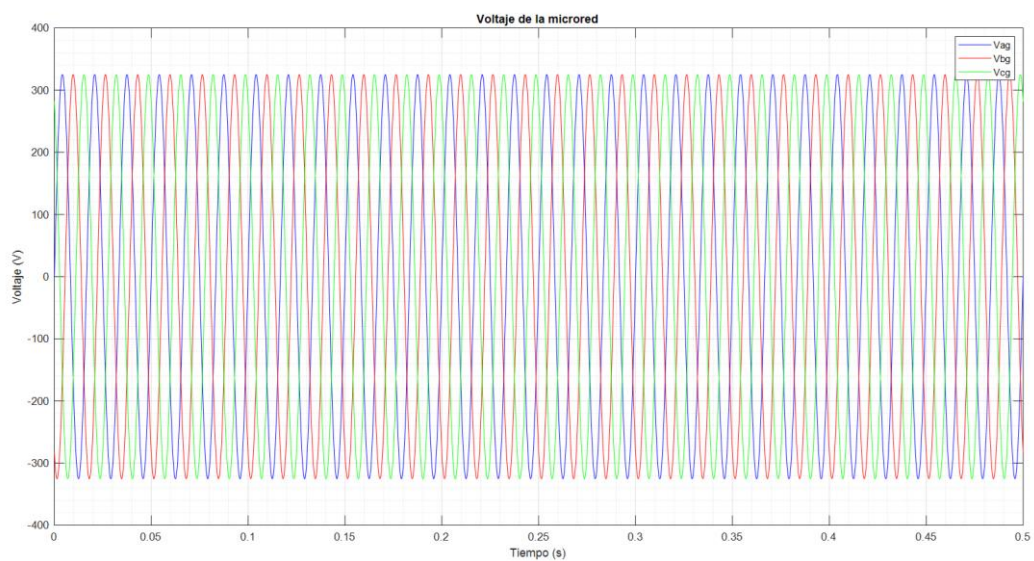
Análisis del Voltaje y la corriente



Nota. La figura muestra el voltaje y la corriente analizada

Figura 14:

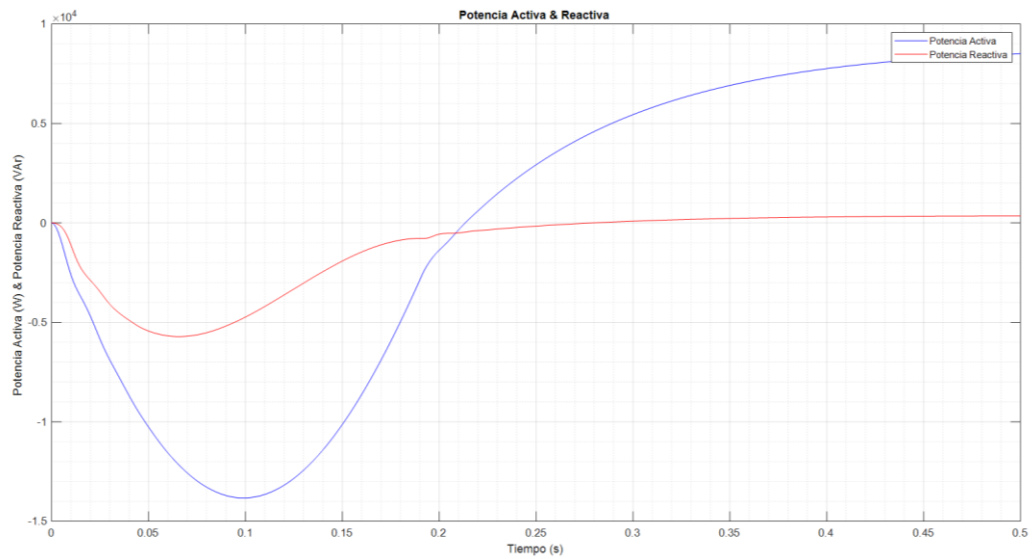
Voltaje de la microrred



Nota. La figura muestra el voltaje de la microrred

Figura 15:

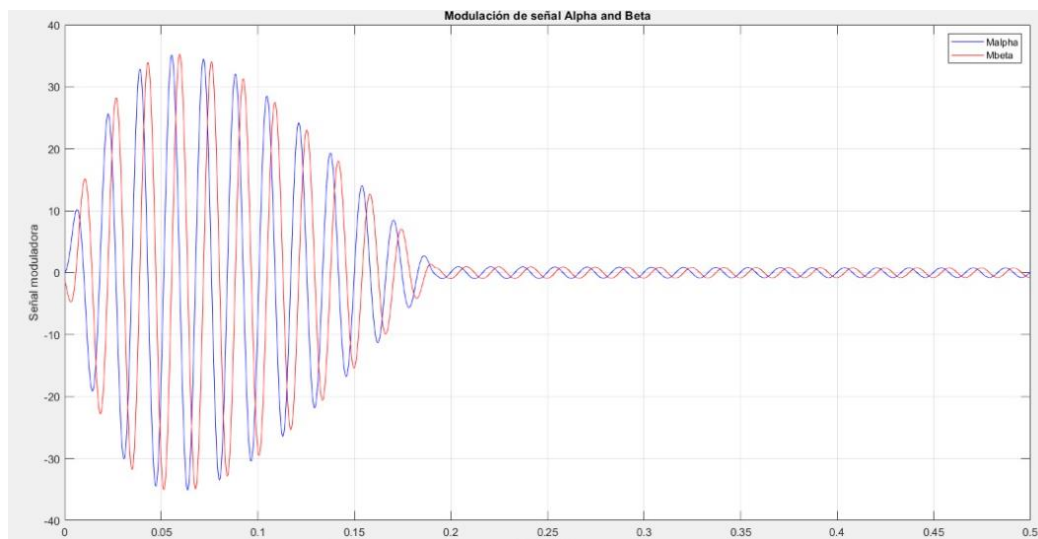
Potencia Activa y Reactiva



Nota. La figura muestra la potencia activa y reactiva obtenida

Figura 16:

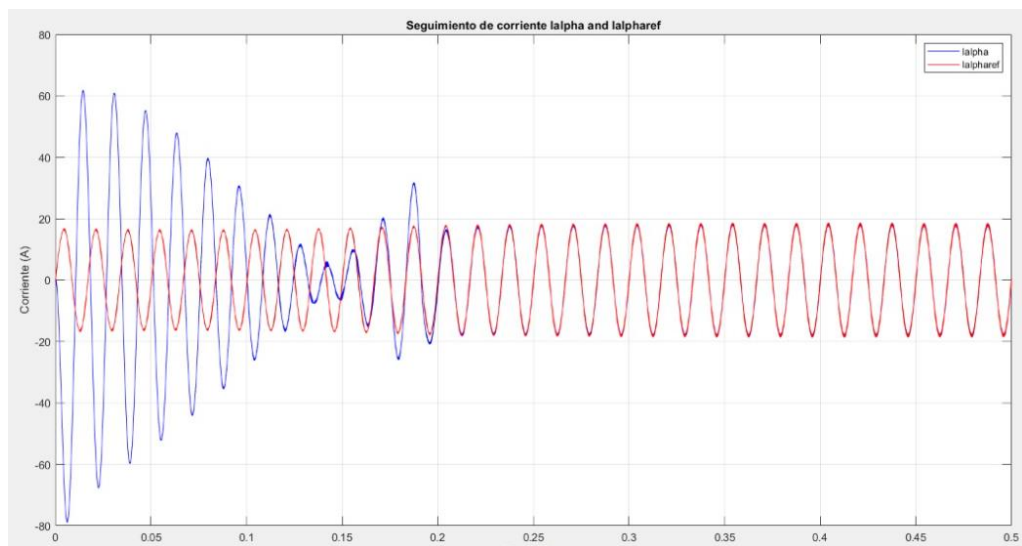
Señal Alpha and Beta



Nota. La figura muestra la modulación de la señal Alpha and Beta

Figura 17:

Corriente lalpha anda lalpharef



Nota. La imagen muestra el seguimiento de la corriente lalpha anda lalpharef

Capítulo 5

5. Propuesta

5.1 Tema de la propuesta

Diseño y simulación de un sistema de generación distribuida fotovoltaica con conexión a la red eléctrica para el autoabastecimiento en el hogar

5.2 Datos Informativos

Nombre de la empresa: Vivienda familiar

Dirección: Distrito metropolitano de quito

Tipo de empresa:

Tamaño de empresa: pequeña

Beneficiarios: Usuarios Distrito metropolitano de quito

5.3 Objetivo general

Realizar el diseño y simulación de un sistema solar fotovoltaico con conexión a la red.

5.4 Objetivos específicos

- Seleccionar el método de control aplicable a cada convertidor estático de potencia y del medidor bidireccional.
- Realizar simulaciones de la operación del sistema de generación distribuida mediante el software MATLAB.

5.5 Justificación del proyecto:

Mediante la modelación del sistema de generación fotovoltaico de conexión a red, podremos analizar el comportamiento de los componentes del sistema mediante la

simulación, así como la gestión de la energía producida ya que podrá satisfacer las cargas de la vivienda e introducir el excedente de energía a la red.

5.6 Diseño de la propuesta

Se propone una Microrred conectada a la red compuesta por un convertidor de alimentación de red para su desarrollo, se procede a la estimación de la radiación solar y demanda de consumo de energía promedio, se asumirá que el lugar donde se instalará el sistema fotovoltaico cuenta con aceptables niveles de radiación solar y se estimara el valor del consumo de demanda de energía de un hogar; tomando en consideración la demanda de energía anteriormente determinada se determina la capacidad de potencia instalada del sistema que a su vez establece la potencia del inversor, en base a esta capacidad se selecciona el número de paneles solares necesarios, y se selecciona los medidores de energía adecuados procediéndose a la simulación del sistema en el software MATLAB.

5.7 Información de la propuesta

5.7.1 Parámetros de función y control

Se presenta una microrred con modo de operación conectado a la red con un inversor operativo, que se presenta como una fuente de corriente conectada en paralelo con una carga local. En este modo de funcionamiento, la red de servicios públicos está definiendo la amplitud de voltaje, la frecuencia y la fase. El objetivo principal de este caso es controlar la población activa y reactiva que se importa y exporta, desde y hacia la red principal, ajustando la señal moduladora producida en el bucle de corriente interna.

Los parámetros eléctricos ajustados para la microrred a estudiar se presentan en la Tabla 1. Los valores definidos para el voltaje de enlace nominal y DC se basan en las características físicas del convertidor buck con comportamiento reductor. Un rango típico para los valores de voltaje se detalla en la Tabla 6.

El voltaje RMS nominal de CA, la resistencia de carga y los componentes de frecuencia nominal se determinaron para limitar la inductancia de carga en un valor por unidad entre 0.05 y 0.10, así como, para lograr un rango de potencia de salida deseado. Las ecuaciones adoptadas para definir estos parámetros se describen en (35).

Tabla 6:

Parámetros eléctricos de la microrred.

Nombre del parámetro	Acrónimo	Valor	Unidad
Tensión nominal	V_{nom}	230	V
Frecuencia	f_{nom}	50	Hz
Frecuencia	ω_{nom}	$2\pi * f_{nom}$	rad/s
Voltaje de enlace	V_{DC}	800	V
Resistencia a la	R_L	22	Ω
Inductancia de	L_L	5	mH
Resistencia de la	R_g	65	mΩ
Inductancia de la	L_g	1	mH
Inversor Inductancia de	L_{o1}	5	mH
Inversor Resistencia de	R_{o1}	0.5	Ω
Inversor Capacitancia del	C_{f1}	10	μF
Inversor Resistencia de	R_{f1}	20	Ω
Inversor Inductancia de	L_{L1}	1	mH
Inversor Resistencia de la línea	R_{L1}	65	mΩ

Nota. La tabla muestra parámetros eléctricos de la microrred

Tabla 7:

Rangos característicos para voltaje de CC y CA

Voltaje DC (V)	Voltaje AC (V)
350–650	110
650–850	230

Nota. La tabla muestra características para voltaje CC-CA

$$P = 3 * \frac{V_{AC}^2}{R_L};$$

Ecuación 8

(P. Martí, Martín, Vicuña, & J. Miret, 2018)

En consecuencia, la potencia activa de salida es de 7kW, lo que produce una corriente de 10 A mediante (36).

$$I = \frac{P}{3*V_{AC}};$$

Ecuación 9

(P. Martí, Martín, Vicuña, & J. Miret, 2018)

Considerando la aproximación (37), para L_{o1} igual a 5 mH, el valor por unidad calculado se encuentra en un rango aceptable.

$$Z = \frac{V_{AC}}{I} \cong R_L = \frac{\omega_{nom}*L_{o1}}{Z};$$

Ecuación 37

(P. Martí, Martín, Vicuña, & J. Miret, 2018)

Los valores de carga de resistencia e inductancia determinan que la carga es más resistiva que inductiva. Asimismo, Los valores de impedancia en la salida del convertidor, la línea local y de red caracterizan los efectos de las pérdidas y los elementos parásitos de los cables de alimentación y la configuración de la red (P. Martí, Martín, Vicuña, & J. Miret, 2018). Los recursos definidos con anterioridad en la Tabla 1 se basaron en los parámetros estudiados por (R, Teodorescu, & Blaabjerg., 2006) y configurados por el laboratorio experimental de redes de generación de distribución de la UPC, tal como se presenta en (Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017).

La salida del convertidor interactúa con la carga a través de un filtro. Los valores del condensador de derivación y la resistencia de amortiguación para el filtro se ajustaron para reducir el ruido y mejorar la potencia de salida durante las perturbaciones en la corriente de carga. La baja impedancia del condensador de filtro proporciona un bypass para los armónicos al conmutar las corrientes armónicas del convertidor, de esta forma se evita que ingresen en la carga y se garantiza el soporte de voltaje en el nodo (Guerrero, Chandorkar, Lee, & Loh, 2013) (Yazdani & Iravani, 2010)

Los parámetros de control se presentan en la Tabla 8. La frecuencia de muestreo en el orden de microsegundos aumenta el tiempo de ejecución para la simulación, sin embargo, se eligió ya que es un valor confiable para evaluar el control.

El valor de la frecuencia de corte sirve para el filtro paso bajo (LPF), que se implementa para atenuar tanto los armónicos como el ruido en el voltaje de salida y la potencia. La frecuencia de corte seleccionada sigue las reglas definidas por [6], donde se establece que esta frecuencia debe ser entre una o dos décadas más baja que la frecuencia nominal, con el fin de garantizar el rechazo del ruido y respuesta transitoria lenta. Esto es una característica deseable en los sistemas de energía eléctrica.

El diseño de los parámetros de control para los compensadores puede variar con diferentes puntos de operación, frecuencia de muestreo y rango de potencia. Los valores de control establecidos son equivalentes y se ajustaron al realizar las simulaciones basadas en las funciones y características principales de cada parámetro.

Tabla 8:
Parámetros de control

Nombre del parámetro	Acrónimo	Valor	Unidades
Frecuencia de muestreo	T_s	1	μs
Frecuencia de corte LPF	ω_c	$0.03 * \omega_{nom}$	rad/s
Ganancia proporcional PI dinámica de referencia de	k_{pp}	0	A^{-1}
Referencia de potencia activa dinámica PI de ganancia integral	k_{ip}	0.5	A_s^{-1}
Ganancia proporcional PI dinámica de referencia de	k_{pq}	0	A^{-1}
Ganancia integral PI dinámica de referencia de potencia reactiva	k_{iq}	0.5	A_s^{-1}
Ganancia proporcional PRES compensador de corriente	k_{pi}	12	A^{-1}
Ganancia integral PRES compensador de corriente	k_{ii}	200	A_s^{-1}
Coefficiente de amortiguación PRES compensador de corriente	shi_i	0.1	

Nota. La tabla muestra los parámetros de control establecidos

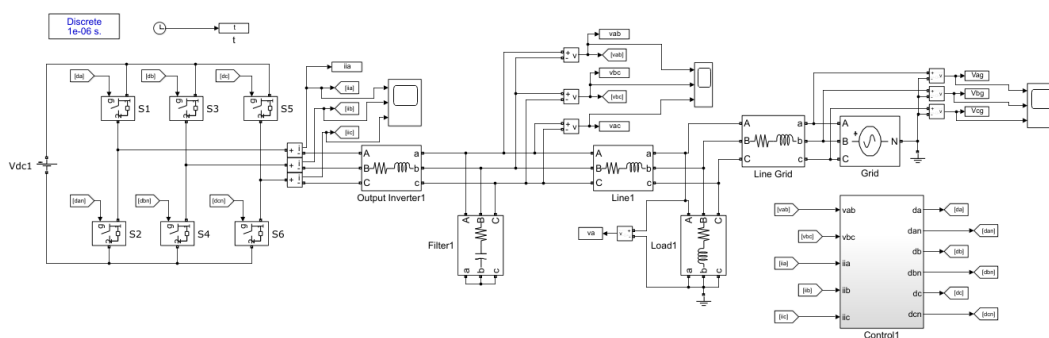
5.7.2 Esquemas y subsistemas

El modelo diseñado presenta una fuente de CC que emula el generador distribuido, interruptores trifásicos de medio puente de transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT) de S1 a S6 que representan un convertidor de CC a CA operado mediante el control de la señal moduladora, así como componentes eléctricos, emulador de red eléctrica de CA y subsistema de control.

En la Figura 16 se presenta el esquema de la microrred compuesta por un convertidor de alimentación de red modelado en serie con una carga local y la red. Asimismo, en la Figura 17 se presenta el subsistema de control del inversor compuesto por tres bloques: Alpha_Beta, que se encarga de convertir un fasor tridimensional en un marco fasorial ortogonal bidimensional definido como alfa y beta ($\alpha\beta$); el lazo de control combinado de potencia y corriente, que genera la señal moduladora con respecto a un valor de referencia predefinido para la potencia activa y reactiva; y la modulación vectorial espacial, que transforma la señal moduladora dada en componentes del eje $\alpha\beta$ en pulsos para cada uno de los seis interruptores de los tres convertidores de medio puente.

Figura 18:

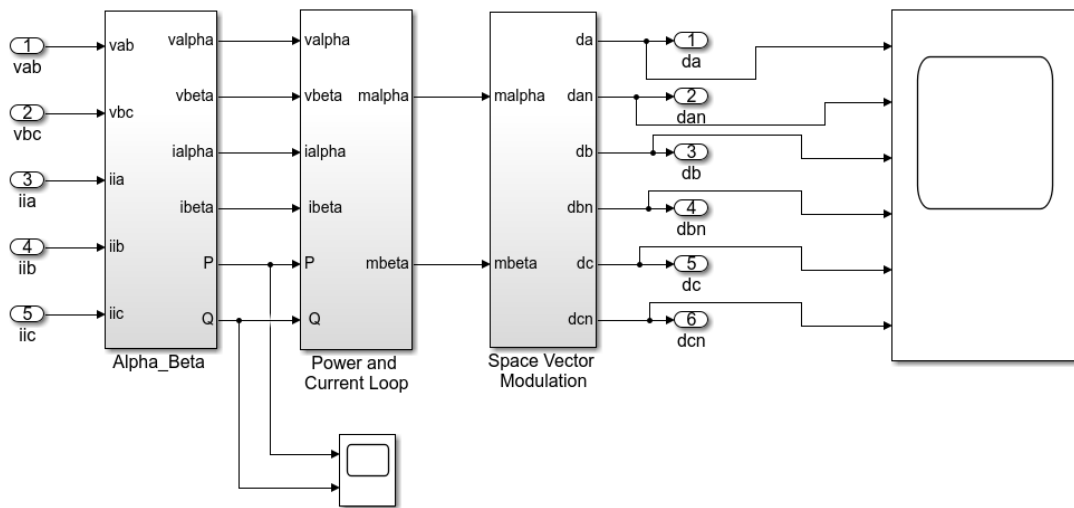
Microrred propuesta



Nota. La figura 18 muestra la propuesta de la microrred

Figura 19

Esquema de sistema de control



Nota. La figura 19 muestra la propuesta de la microrred

Con el objetivo de simplificar el análisis y el control de los convertidores trifásicos, los términos de fasor tridimensional se representan por medio de componentes $\alpha\beta$ -frame, expresados por (38) por la transformada simplificada de sistemas equilibrados, definida por la Transformada de Clarke (Yazdani & Iravani, 2010).

$$\begin{bmatrix} f_{\alpha}(t) \\ f_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix}$$

Ecuación 10

(Yazdani & Iravani, 2010)

Las funciones de amplitud y sinusoidales del sistema de referencia $\alpha\beta$ se expresan como en (39), (40) y (41). (Yazdani & Iravani, 2010)

$$\hat{f}(t) = \sqrt{f_{\alpha}^2 + f_{\beta}^2};$$

Ecuación 11

(Yazdani & Iravani, 2010)

$$f_{\alpha}(t) = \hat{f}(t) * \cos [\theta(t)];$$

Ecuación 39

(Yazdani & Iravani, 2010)

$$f_{\beta}(t) = \hat{f}(t) * \sin [\theta(t)];$$

Ecuación 40

(Yazdani & Iravani, 2010)

En la simulación, la fase tridimensional se convierte en $\alpha\beta$ -frame utilizando la Transformada de Clarke, como se ilustra en la Figura 18.

La integración entre MATLAB y Simulink permite incorporar algoritmos a los modelos. Es así como, el código de MATLAB implementado para el subsistema de Transformación de Clarke se describe como sigue:

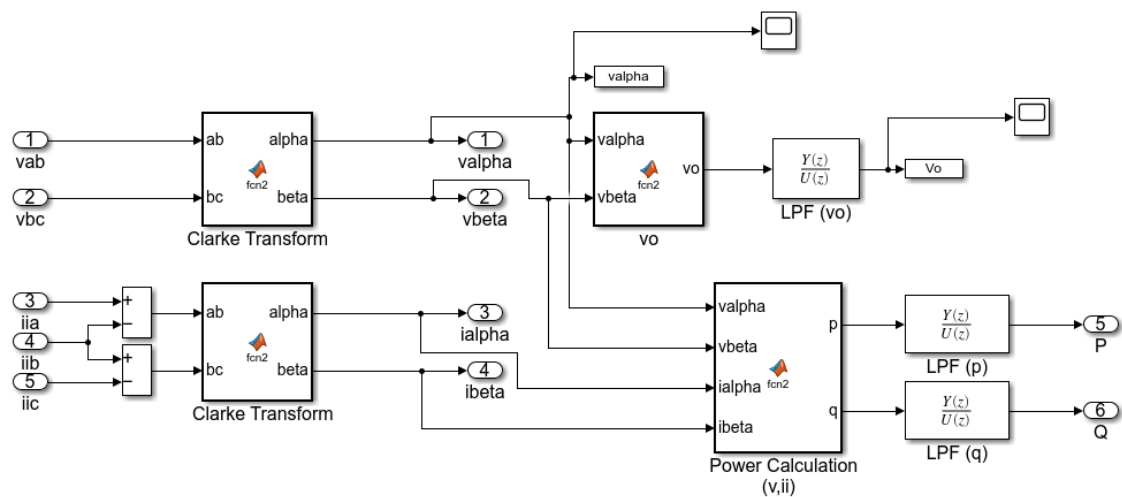
```
function [alpha,beta] = fcn2(ab,bc)
```

```
alpha=(ab*2+bc)/3;
```

```
beta=(sqrt(3)/3)*bc;
```

Figura 20:

Esquema del subsistema de la trama $\alpha\beta$.



Nota. La figura 20 muestra el esquema del subsistema de la trama

Esta transformación se aplica para generar la tensión de salida dando como resultado v_{α} , v_{β} , que son variables utilizadas para determinar la amplitud del valor de la tensión de salida V_o como en (39), descrito por el siguiente código:

```
function vo = fcn2(valpha,vbeta)
vo=sqrt(valpha^2+vbeta^2);
```

También se implementa la trama $\alpha\beta$ para convertir las componentes de la corriente, definidas como i_{α} e i_{β} , que combinadas con la v_{α} y v_{β} son variables encargadas de controlar las señales de potencia activa y reactiva, tal y como propone en (Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017) (Yazdani & Iravani, 2010), con las expresiones (42) y (43).

$$p = \frac{3}{2}(v_{\alpha} * i_{\alpha} + v_{\beta} * i_{\beta})$$

Ecuación 12

(Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017)

$$q = \frac{3}{2}(-v_{\alpha} * i_{\beta} + v_{\beta} * i_{\alpha})$$

Ecuación 43

(Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017)

Las componentes de potencia activa y reactiva en el algoritmo de la trama $\alpha\beta$ aplicado en la función de MATLAB se describe a continuación.

```
function [p,q] = fcn2(valpha,vbeta,ialpha,ibeta)
p=(3/2)*(valpha*ialpha+vbeta*ibeta);
q=(3/2)*(-valpha*ibeta+vbeta*ialpha);
```

Tanto la tensión de salida como los componentes de potencia incluyen LPF para mitigar el ruido y los armónicos, así como para la respuesta dinámica lenta.

La función de transferencia en el dominio de Laplace para cada elemento se representa mediante (44), (45) y (46) (Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017) (Souza & Castilla, 2018.)

$$V_o(s) = v_o(s) * \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

Ecuación 44

(Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017)

$$P(s) = p(s) * \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

Ecuación 45

(Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017)

$$Q(s) = q(s) * \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

Ecuación 46

(Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017)

En MATLAB todas las funciones de transferencia se convierten de modelo de sistema dinámico continuo a tiempo discreto a la velocidad de muestreo t_s , utilizando la integración de Tustin, que se basa en el método de Euler regresivo con una precisión y estabilidad numérica adecuada.

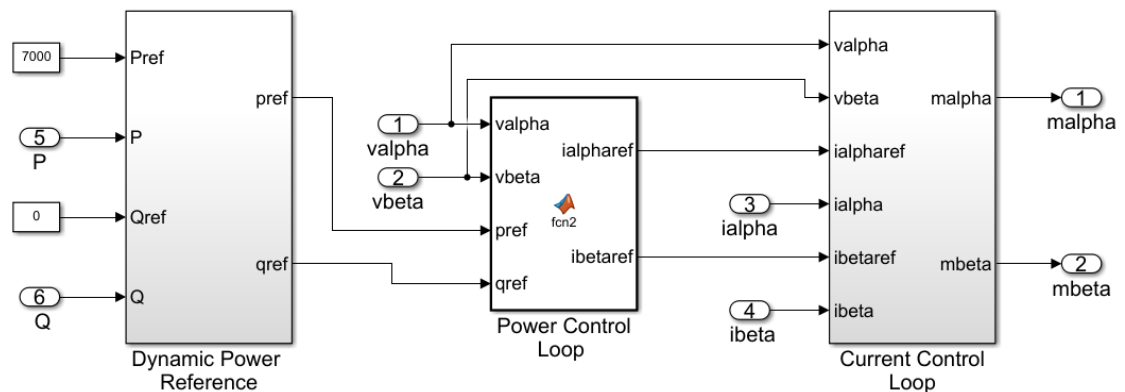
A partir de la tensión de salida del convertidor en el marco $\alpha\beta$ y de los valores de referencia establecidos en unidad de [W] para la potencia activa y [VAr] para la reactiva, el lazo de control de potencia produce una corriente de referencia. Estas componentes de corriente, definidas como $i_{\alpha\beta ref}$ e $i_{\beta\alpha ref}$, se implementan en un lazo de control de corriente interno para producir señales de modulación para los interruptores del puente IGBT (Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017). La figura 4 ilustra los bucles de control de potencia y corriente junto con un bloque de referencia de potencia dinámica.

El bloque de referencia de potencia dinámica tiene como objetivo garantizar los valores de referencia de potencia activa y reactiva definidos en la respuesta de estado estacionario, comparando los valores de referencia con los estimados a partir de las mediciones de corriente y tensión y mitigando el error mediante una compensadora integral proporcional (PI). El esquema del subsistema de referencia de potencia dinámica se ilustra en la Figura 19.

Las funciones de transferencia PI introducidas en el subsistema de referencia dinámica de potencia se describen en (47) y (48).

Figura 21:

Esquema del subsistema de control de potencia y corriente



Nota. La figura 21 muestra el esquema del subsistema de potencia y corriente

$$PI(s) = \frac{k_{pp}s + k_{ip}}{s}$$

Ecuación 47

(Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017)

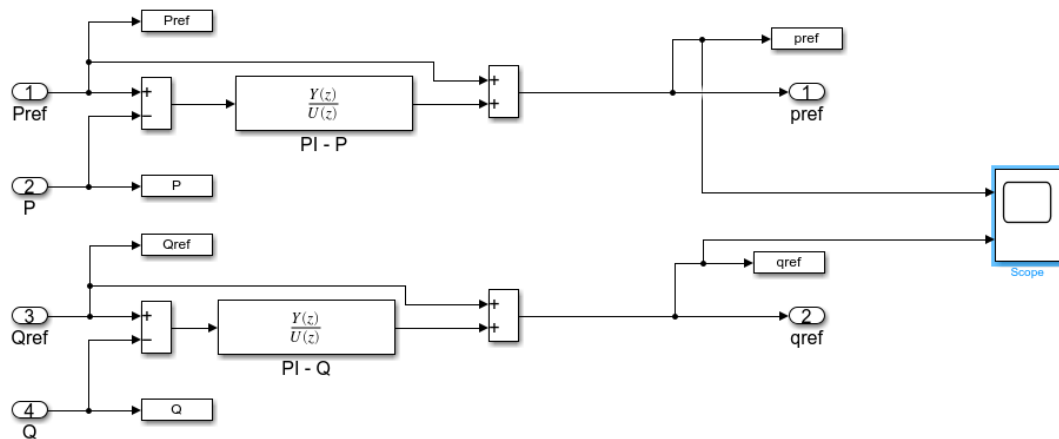
$$PI(s) = \frac{k_{pq}s + k_{iq}}{s}$$

Ecuación 48

(Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017)

Figura 22:

Esquema del subsistema de referencia de potencia dinámica



Nota. La figura 22 muestra el esquema del subsistema de referencia de potencia dinámica

El código de simulación implementado para el subsistema Power Control Loop se presenta a continuación.

```
function [ialpharef,ibetaref] = fcn2(valpha,vbeta,pref,qref)
den=1/(valpha^2+vbeta^2);
ialpharef=(2/3)*(valpha*pref+vbeta*qref)*den;
ibetaref=(2/3)*(vbeta*pref-valpha*qref)*den;
```

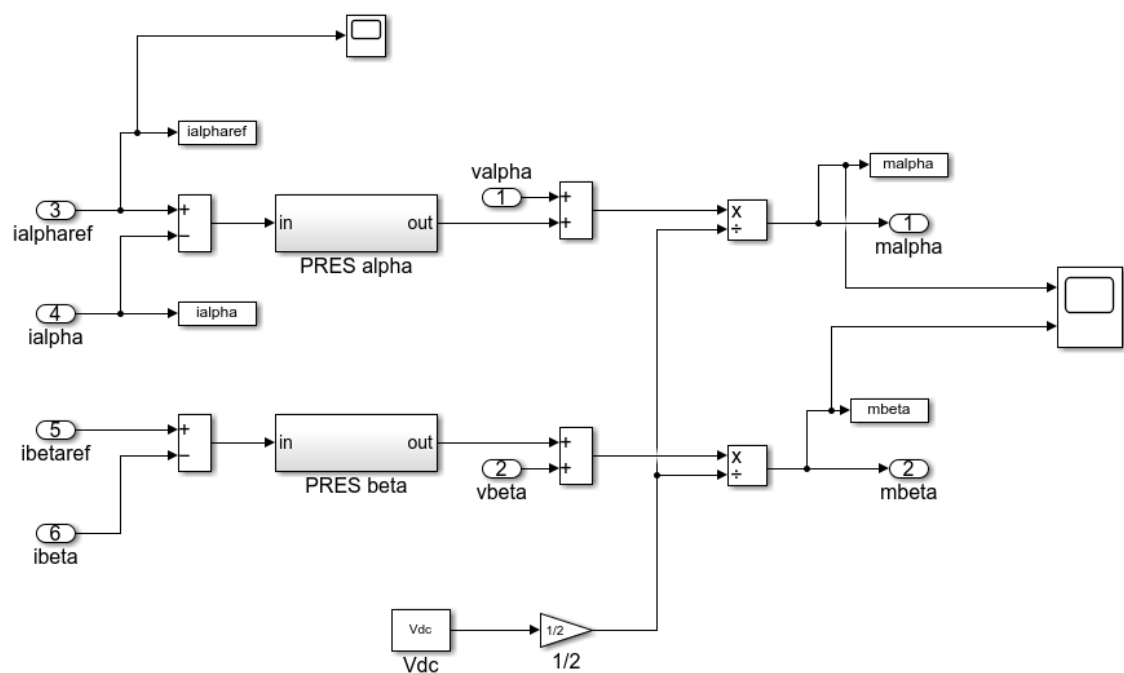
En el subsistema de control de corriente interior, se aplica un compensador proporcional más resonante (PRES) para procesar y eliminar el error de corriente generado por la comparación entre la corriente de referencia y la corriente de salida, produciendo una señal de control de error, como se ilustra en la Figura 6. En este bucle se aplica un término feed-forward correspondiente a la tensión de salida, se aplica para mitigar el acoplamiento dinámico entre la salida del convertidor y la red, acelerando la respuesta frente a perturbaciones externas. El término feed-forward, añadido a la señal de control, se multiplica por $V_{dc}/2$, debido a la tensión de división suministrada del convertidor de medio puente, generando las señales moduladoras que impulsan los pulsos de modulación

vectorial espacial para los interruptores del convertidor (Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017).

La Figura 23 ilustra el subsistema PRES, mientras que (49) y (50) describen las funciones de transferencia del PRES. La ganancia proporcional del compensador k_{pi} se ajustó para proporcionar una respuesta transitoria eficaz, mientras que la ganancia integral k_{ii} y el coeficiente de amortiguación sh_i se diseñaron para mitigar el error de corriente y mejorar la respuesta en estado estacionario.

Figura 23

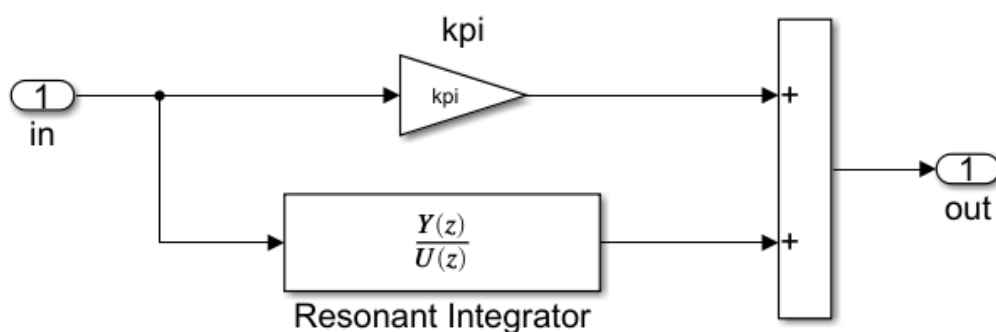
Esquema del subsistema de bucle de control de corriente



Nota. La figura 23 muestra el esquema del subsistema de bucle de control de corriente

Figura 24:

Esquema del subsistema PRES.



Nota. La figura 24 muestra el esquema del subsistema PRES

$$P_k(s) = k_{pi}$$

Ecuación 49

(Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017)

$$RES(s) = \frac{k_{ii} * 2 * shi_i * \omega_{nom} s}{s^2 + shi_i * \omega_{nom} s + \omega_{nom}^2}$$

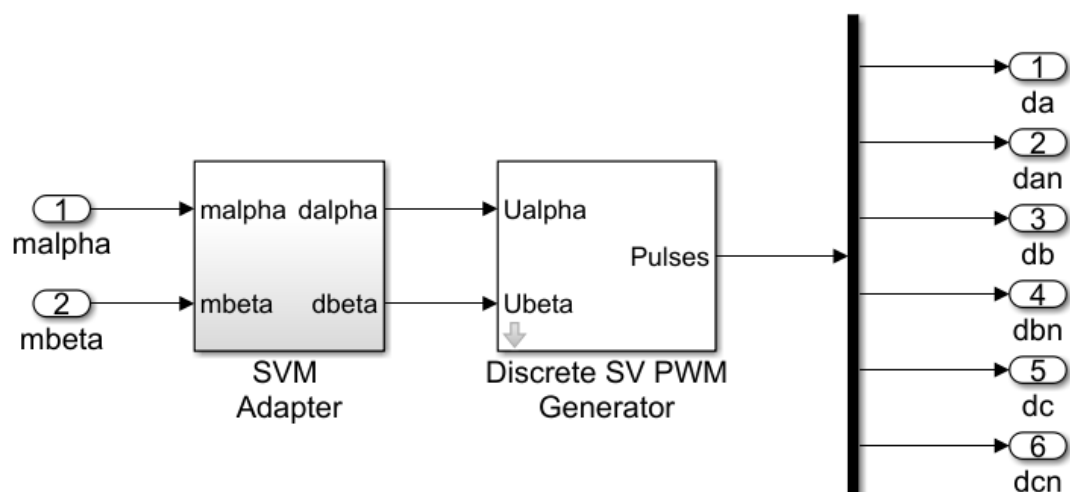
Ecuación 50

(Miret, Vicuña, Guzmán, Camacho, & Ghahderijani, 2017)

Utilizando la modulación vectorial espacial (SVM), las señales moduladoras, denominadas malpha y mbeta, generadas por el lazo de control de corriente, se convierten en pulsos para cada uno de los interruptores de medio puente, como se ilustra en la Figura 20. Sin embargo, para estar de acuerdo con las propiedades y la caracterización del subsistema con respecto al generador de modulación de ancho de pulso de vector espacial discreto (SV PWM) se tuvo que aplicar una adaptación de las componentes moduladoras alfa y beta, como se demuestra en la Figura 23.

Figura 25:

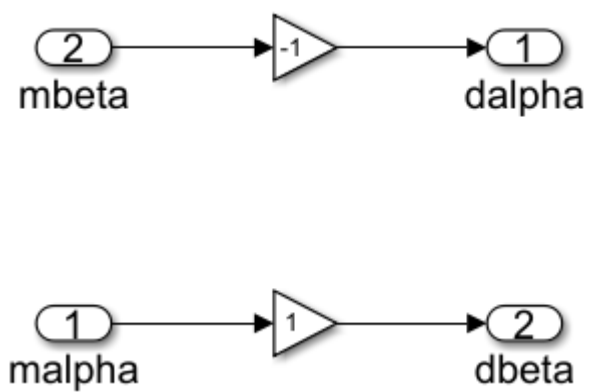
Esquema del bloque SVM.



Nota. La figura 25 muestra el esquema del bloque SVM

Figura 26:

Subsistema adaptador a SVM



Nota. La figura 26 muestra el esquema del subsistema adaptador a SVM

Capítulo 6

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Para la implementación de la simulación de los módulos fotovoltaicos fue requerida la implementación de algoritmos de simulación para permitir que el sistema trabaje a máxima potencia.
- En la gráfica de seguimiento de corriente I_{α} and $I_{\alpha_{ref}}$ en $t=0.09s$, I_{α} se aleja de $I_{\alpha_{ref}}$ debido al comportamiento de la curva de irradiación, en $t=12s$ se puede ver la sintonización del integrador resonador colocado en el control atenuando así los picos propios generados por el sistema.
- El uso de controladores resonantes para la compensación de armónicos y la amortiguación activa para la estabilización del sistema da como resultado un rendimiento óptimo del sistema siempre que se utilice un procedimiento de sintonización adecuado.
- Para la modelación del sistema fotovoltaico conectado a la red se tomaron en cuenta los parámetros de diseño con respecto al funcionamiento de los elementos del sistema, cumpliendo con lo establecido en las regulaciones vigentes.

6.2 Recomendaciones

- Para el desarrollo de próximas investigaciones se plantea la ejecución del sistema para el estudio de su procedimiento bajo condiciones reales.
- Se recomienda establecer nuevos estudios para condiciones de climas de bajo sol para obtener resultados ante eventos críticos.

Bibliografía

Agencia Internacional de Energía. (2002). *Distributed generation in liberalized electricity market*. IEA Publications.

Real Academia de la Lengua Española. (s.f.). Obtenido de <http://dle.rae.es/srv/fetch?id=FGD8otZ#SylDIYL>

Acesolar. (8 de 1 de 2022). *Generación Distribuida*. Obtenido de <http://www.acesolar.org/que-es-generacion-distribuida/>

ARCERNNR. (2021). *Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables*. Obtenido de <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/>

Asamblea Constituyente del Ecuador . (2008). *constitución de la república del Ecuador* .

Autosolar. (26 de enero de 2022). *Autosolar*. Obtenido de www.autosolar.es: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-es-un-regulador-de-carga>

Casa, M., & Barrio, M. (2012). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Barcelona: Marcombo.

Castejón, A., & Santamaría, G. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Editex.

Castejón, A., & Santamaría, G. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. España: Enditex.

Chito, J. E., & Copete, D. A. (2011). *sistema fotovoltaico de 8kW interconectado a la red* . Santiago de cali .

CONELEC. (18 de enero de 2008A). *Aplicación del mandato Constituyente No.15 (Regulación No. CONELEC 006/08)*. Obtenido de http://WWW.conelec.gob.ec/normativa_detalle.php?cd_norm=260

EEQ. (28 de 02 de 2014). *NORMAS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCION*. Obtenido de <http://ftp.eeq.com.ec/upload/informacionPublica/2014/NORMAS%20PARA%20SISTEMAS%20DE%20DISTRIBUCION%20PARTE%20A.pdf>

Guerrero, J. M., Chandorkar, M., Lee, T. L., & Loh, P. C. (2013). "Advanced control architectures for intelligent microgridspart i: Decentralized and hierarchical control" . *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4. .

Holgúin, M., & Gomezcoello, D. (2010). *Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana*. Guayaquil.

- Instituto Tecnológico de Canarias. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Canaria: ITC.
- Juárez, J. (1995). *Sistemas de distribución de energía eléctrica*. Mexico: UNAM.
- Macancela, L. (2012). Diagnóstico de la Implementación de los Sistemas Fotovoltaicos correspondientes a la primera etapa del Proyecto Yantsa II Ersari". Cuenca.
- Martínez, A. (2012). *Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicos*. España: Elearning.
- Mascarós, V. (2016). *Gestión del montaje de instalaciones solares fotovoltaicas*. España : Paraninfo.
- Mathworks. (2021). *Matlab*. Obtenido de https://es.mathworks.com/?s_tid=gn_logo
- Ministerio de Energías . (2019). *Estudio técnico de viabilidad para la introducción de Generación Distribuida (GD) a través de Energías Alternativas Renovables a la red eléctrica en baja y media tensión (BT y MT) en Bolivia, incluyendo análisis de interconexión de sistemas híbridos* .
- Miret, J., Vicuña, J. L., Guzmán, R., Camacho, A., & Ghahderijani, M. M. (2017). "A flexible experimental laboratory for distributed generation networks based on power inverters". *Energies*, vol. 10, no. 10, .
- Morales Pizuña, J. S. (2021). *Implementación de un prototipo de un sistema de carga, con energía fotovoltaica para los dispositivos electrónicos en los chalecos de combate del personal militar de la Fuerza Terrestre*. Latacunga.
- P. Martí, M. V., Martín, E. X., Vicuña, L. G., & J. Miret, a. M. (2018). "Performance Evaluation of Secondary Control Policies With Respect to Digital Communications Properties in Inverter-Based Islanded Microgrids,". *IEEE Transactions on Smart Grid*.
- R, M. L., Teodorescu, & Blaabjerg., F. (2006). "Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values" . *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 1, pp. 263–271, 2006, doi: 10.1109/TPEL.2005.
- Renova energía . (6 de 1 de 2022). *Inversores de conexión a red*. Obtenido de <https://www.renova-energia.com/productos/inversores-conexion-red/>
- Renova Energía. (2019). *Baterías de Ciclo Profundo*.

- Sotysolar. (26 de enero de 2022). *Paneles solares monocristalinos o policristalinos*. Obtenido de <https://sotysolar.es/placas-solares/monocristalinas-policristalinas>
- Souza, A. C., & Castilla, M. (2018.). *Microgrids design and implementation*. . Springer International Publishing, doi: 10.1007/978-3-319-98687-6.
- Tobajas, M. (2018). *Energía solar fotovoltaica*. España: CANOPINA.
- W. P. M. H. Heemels, D. L. (2009). *Introduction to hybrid systems*. Cambridge University Press.
- Xataka . (26 de enero de 2022). *Los paneles solares orgánicos se lo ponen muy difícil a los convencionales: son más baratos, flexibles y cada vez más eficientes*. Obtenido de <https://www.xataka.com/energia/paneles-solares-organicos-se-ponen-muy-dificil-convencionales-baratos-flexibles-cada-vez-eficientes>
- Yazdani, A., & Iravani, R. (2010). *Voltage-sourced converters in power systems : modeling, control, and applications*. . IEEE Press/John Wiley.

ANEXOS